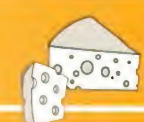
ISSN 0253-2549





LE LAIT ET LES PRODUITS LAITIERS



dans la nutrition humaine



LE LAIT ET LES PRODUITS LAITIERS
dans la nutrition humaine

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE
Rome, 1995

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Catalogage avant publication de la Bibliothèque David Lubin
FAO, Rome (Italie)

Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine
(Collection FAO: Alimentation et nutrition n° 28)
ISBN 92-5-203534-6

1. Lait 2. Produit laitier 3. Nutrition humaine
I. Titre II. Série

Code FAO: 86 AGRIS: S01



Préface

Dans les trois premières décennies de son existence, la FAO a publié une série d'études sur la nutrition. L'une d'entre elles, parue en 1972, *Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine*, s'efforçait de faire le point des connaissances en matière de composition et de valeur nutritive du lait, des procédés technologiques pour conserver le lait dans les différents pays du monde et des mesures à prendre pour assurer un approvisionnement en lait à ceux qui en ont le plus besoin.

Vingt ans après, il a paru nécessaire de procéder à une refonte de cet ouvrage qui tienne compte de l'évolution de la connaissance scientifique et technique et cherche à répondre au mieux aux attentes de notre lectorat potentiel, maintenant mieux formé.

Sans la pratique de l'allaitement (au sein), l'espèce humaine n'aurait pu survivre et ce n'est que très récemment que l'on a assisté à la baisse de cette pratique. Jusqu'au début du XXe siècle, l'enfant a toujours et partout été allaité pendant plusieurs mois. Comme pour toute espèce animale, le lait humain est l'aliment qui assure au mieux le développement du nourrisson et de chacun de ses organes. C'est ainsi par exemple que, par sa composition, il permet la synthèse de molécules qui composent le cerveau humain et assurent la transmission de l'influx nerveux. Les avantages indéniables de l'allaitement sur l'état de nutrition et de santé du nourrisson, tout comme les risques qu'il encourt quand il est nourri au biberon, ont conduit les Nations Unies à

encourager la pratique de l'allaitement. Aussi a-t-il été jugé indispensable de commencer la présente publication par un chapitre entièrement nouveau traitant des propriétés physico-chimiques, de la composition et des qualités nutritionnelles du lait de femme.

Depuis 10 000 ans environ, la domestication et l'élevage de l'animal ont permis à l'homme d'accéder à d'autres sources de lait. Le chapitre 2 présente les caractéristiques des laits des espèces domestiques, au premier rang desquelles l'espèce bovine, en prenant le lait de femme comme base de référence. Dans toutes les espèces (humaine et animales), la composition du lait est sujette à variation: les deux premiers chapitres présentent les principales sources de cette variabilité.

Les chapitres 3 à 8 présentent les principes de technologie et les modalités de fabrication des différents types de produits laitiers. Les propriétés nutritionnelles des divers types de produits (y compris des produits laitiers fermentés) y sont analysées ainsi que l'évolution de la consommation de certains d'entre eux.

Le dernier chapitre aborde la place du lait et des produits laitiers dans l'alimentation du sujet en bonne santé ou atteint de diverses pathologies, en particulier de l'enfant mal nourri. En dehors de la période infantile, le lait animal constitue un aliment complémentaire particulièrement indiqué pour redresser ou corriger des déficits latents ou avérés, surtout en situations nutritionnelles critiques.

La FAO tient à remercier vivement les professeurs D. Lemonnier, D. Brasseur et F. Weber, auteurs d'un manuscrit solidement documenté sur les différents laits, leur composition, leur technologie et leur utilisation. La Division des politiques alimentaires et de la nutrition et la Division de la production et de la santé animales dans

un effort conjoint ont redimensionné ce manuscrit pour le rendre plus adapté aux besoins et aux attentes du lectorat potentiel.

Cet ouvrage s'adresse plus particulièrement aux cadres des secteurs de l'agriculture et de la santé ayant suivi une formation post-secondaire de trois ou quatre ans. Cela correspond en général au niveau de formation initiale des vulgarisateurs agricoles, des spécialistes de l'économie familiale, des infirmier(e)s, des assistantes sociales, des techniciens en nutrition et en technologie alimentaire. La lecture de cet ouvrage peut également s'avérer intéressante pour un public de cadres superieurs en agronomie ou en médecine souhaitant s'ouvrir à des domaines qui ne sont pas du ressort de leurs spécialités.

John Lupien
Directeur
Division de l'alimentation et de la nutrition

Table des matières

Tableaux

Figures

Chapitre 1

Le lait de femme

INTRODUCTION

L'allaitement maternel a constitué depuis toujours le mode alimentaire naturel et, jusqu'à récemment, quasi exclusif des nouveau-nés et nourrissons. Avec le XX[e] siècle, l'alimentation artificielle, basée essentiellement mais non exclusivement sur l'emploi du lait de vache, a pris un réel essor dans les pays industrialisés où ce changement de comportement a répondu à un besoin social (Vis et Hennart, 1978).

Ce bouleversement n'a été possible que grâce à des procédés technologiques nouveaux, assurant mieux l'hygiène et la conservation des laits. En préconisant un usage autre que celui prévu par la nature, les biologistes et médecins ont découvert bien involontairement les avantages et les inconvénients des divers laits animaux en nutrition infantile. Il y a déjà un siècle, Bunge (1898) avait montré qu'il existe une relation entre le temps de doublement du poids de naissance et les teneurs lactées en protéines et en minéraux des mammifères qu'il avait étudiés (tableau 1).

Les conséquences néfastes sur bien des points de l'alimentation artificielle des nourrissons ont suscité un regain d'intérêt pour l'allaitement maternel et stimulé les recherches sur les propriétés spécifiques des laits animaux. Si les différences entre les laits de diverses espèces ne s'expliquent pas toutes, elles trouvent, au sein de chacune d'elles, des compensations qui les annulent ou les atténuent, ainsi que le montre le cas du fer, peu abondant dans tous les laits. L'enfant nouveau-né vit sur ses réserves hépatiques alors que le porcelet absorbe quasiment dès sa naissance le fer qu'il trouve en fouillant le sol. Ainsi, soit le lait est adapté aux besoins et à la croissance du petit, soit les comportements alimentaires innés ou les réserves propres pallient les carences nutritives du lait.

Une réflexion analogue peut être faite sur les facteurs immunitaires des

TABLEAU 1
Composition du lait de divers mammifères et vitesse de croissance de la progéniture

Espèces	Nombre de jours pour doubler le poids de naissance	Teneur du lait (*g/litre*)			
		Lipides	Protéines	Lactose	Cendres
Femme	180	38	9	70	2
Jument	60	19	25	62	5
Vache	47	37	34	48	7
Renne	30	169	115	28	–
Chèvre	19	45	29	41	8
Brebis	10	74	55	48	10

Source: Bunge, 1898.

laits. La teneur en immunoglobulines du colostrum et du lait de transition varie fortement selon les espèces. Il en va de même pour leur absorption intestinale chez le nouveau-né. Ces facteurs de protection immunitaire contribuent à assurer le développement et l'intégrité de la muqueuse intestinale et donc son pouvoir d'assimilation. Un lait privé de ses facteurs immunitaires ne permet sans doute plus aux capacités digestives de s'exprimer pleinement et n'est plus, au plan nutritif, le même lait.

Le lait représente l'aliment idéal pour le jeune de l'espèce, mais pour un temps limité et dans certaines conditions seulement d'état des réserves initiales, de comportement, de milieu de vie. Son intérêt nutritif se restreint encore s'il est destiné aux membres d'une autre espèce. C'est sur ces lacunes que doit porter l'attention en nutrition humaine, non pas pour déprécier les autres laits, mais pour les utiliser avec discernement. On peut utiliser un lait animal complémenté ou en complément et, de ce fait, il demeure dans bien des sociétés humaines une base nutritionnelle irremplaçable.

IMPORTANCE NUTRITIONNELLE

En nutrition infantile, la composition du lait maternel est une sorte d'étalon-or. Tout composé qui s'y trouve possède à priori une utilité nutritionnelle ou

immunitaire. Quand, dans le jeune âge, le lait de femme vient à manquer, le substitut proposé devrait ressembler au lait humain plus en ce qui concerne ses fonctions biologiques qu'en ce qui concerne sa composition chimique. Aucun lait animal ne possède naturellement ses qualités, ce qui est logique s'ils sont eux aussi profilés pour répondre au mieux aux besoins de chaque espèce. C'est donc la composition du lait de femme qu'il importe de bien connaître en nutrition infantile.

Ces données permettent d'établir la quantité des divers éléments nutritifs qui favorisent une croissance harmonieuse. Par comparaison, il est possible d'en déduire la valeur d'un lait animal en nutrition humaine. Cette confrontation reste très théorique (des moyennes sont comparées entre elles) et est, de plus, entachée d'erreurs, car le taux d'un nutriment dans le lait ne présume pas de sa biodisponibilité: certains minéraux sont plus ou moins fortement liés à des protéines porteuses, certains acides aminés ou gras sont piégés dans des substances complexes (protéines, triglycérides).

Ces comparaisons permettent surtout de suspecter des insuffisances dans les laits animaux (acides gras essentiels, vitamines, oligo-éléments), et des apports toxiques sont également à craindre lorsque les teneurs s'avèrent franchement excédentaires (azote, calcium et phosphore) pour l'être humain.

Non seulement le lait maternel imprime les caractéristiques de croissance et de développement (que certains jugent idéales), mais encore sa composition subit des variations qui semblent également répondre aux besoins changeants du petit. Cette dynamique existe dans toutes les espèces, mais est spécifique de chaque espèce.

Le nutritionniste s'intéresse moins aux concentrations lactées qu'aux besoins infantiles réels. C'est en termes d'apports journaliers, donc en calculant d'après le débit lacté de 24 heures (variant chez la femme souvent de 600 à 850 ml/jour), que les valeurs des besoins quotidiens sont établies pour les premiers mois. Lorsque l'allaitement n'est plus exclusif, de telles déductions ne sont plus possibles. Il en va de même en situation de malnutrition maternelle sévère (débit lacté parfois inférieur à 300 ml/jour) (OMS, 1987).

COMPOSITION

Caractéristiques physico-chimiques

Le lait humain contient environ 87 pour cent d'eau et son osmolarité, voisine de 290 mOsm/litre, est proche de celle du plasma (de 250 à 290 mOsm/litre). La densité spécifique du lait maternel varie de 1,026 à 1,037 et le poids des matières sèches varie de 100 à 175 g/litre (tableau 2). Plus de la moitié de cette masse est constituée de lactose (de 70 à 80 g/litre), un quart environ de lipides (de 35 à 40 g/litre) et une part bien moindre de protéines (10 g/litre environ) et de minéraux (2 g/litre).

Les protéines sont présentes dans le lait en suspension colloïdale (micelles) et c'est leur dispersion avec les sels de calcium qui donne cette opacité caractéristique dite «laiteuse». Les glucides (le lactose) s'y trouvent en solution vraie alors que les lipides s'y trouvent sous forme de globules gras répartis (ou émulsionnés) dans la phase aqueuse. La dimension des globules gras varie de 1 à 3 micron(s) dans le colostrum et le lait de transition pour augmenter quelque peu (de 3 à 6 microns) dans le lait mature, ce qui n'est pas sans rapport avec sa digestibilité.

L'essentiel (80 pour cent) des structures membranaires présentes dans le lait humain compose la paroi des globules gras, une faible proportion (20 pour cent) se retrouve dans la phase solide du lactosérum et une infime quantité se trouve dans les cellules somatiques (lymphocytes, macrophages).

Lors de la formation des gouttelettes lipidiques dans les cellules de la glande mammaire, une membrane (dérivée de l'appareil de Golgi) vient entourer le futur globule gras. Ces parois sont faites de (glyco-) protéines, de phospholipides, de triglycérides, de cholestérol et d'enzymes. Elles jouent un rôle d'émulsifiant et empêchent la lipolyse spontanée et l'oxydation trop facile des graisses du lait, ce qui lui évite de rancir et lui conserve un goût agréable.

La réalisation de l'émulsion permet la dispersion des lipides au sein de la phase aqueuse; la conservation au froid «casse» l'émulsion et sépare les deux phases. Une coalescence des globules gras survient aussi après l'addition intempestive ou exagérée d'acides gras à chaîne moyenne, d'huiles végétales, d'amidons ou d'autres produits d'enrichissement. Les

parois du globule gras sont déstabilisées sous l'action détergente des sels biliaires, ce qui permet aux lipases (linguales, pancréatiques et celles du lait) d'hydrolyser les triglycérides.

L'existence même des globules gras revêt une importance nutritionnelle fondamentale, qui va au-delà du simple transport ou de la digestion des lipides. Ces globules représentent l'apport principal d'énergie et d'acides gras essentiels. Ils contribuent aussi à l'apport de vitamines liposolubles, de (glyco-)protéines, phospholipides et de cholestérol. Le cholestérol du lait est incorporé chez le nourrisson dans les tissus de l'organisme en croissance (cerveau notamment). Les glycoprotéines sont à l'abri de l'hydrolyse digestive et certaines hormones (ACTH, TSH) traversent intactes la paroi intestinale pour entrer dans la circulation. Les parois membranaires contiennent également des sphingomyélines, de la phosphatidyl-choline et des gangliosides qui entrent dans la composition des tissus nerveux.

Valeur énergétique

La teneur énergétique moyenne du lait mesurée en kilocalories est proche de 690/litre, mais les valeurs individuelles varient considérablement (tableau 12).

Protéines et substances azotées

Azote total. L'azote total du lait maternel (l'équivalent des «matières azotées» en terminologie industrielle) est un paramètre chiffré peu usité en pratique médicale. On préfère lui substituer, en le subdivisant, l'azote en protéines (en g/litre) et l'azote non protéique (dénommé d'après les initiales anglo-saxonnes NPN: non protein nitrogen) et rapporté en g/litre ou en g d'azote/litre (g N/litre). Dans le lait maternel, les protéines et l'azote non protéique représentent respectivement environ 75 et 25 pour cent de la composante azotée totale.

Protéines. Le taux des protéines totales du lait maternel (tableau 3) est compris entre 12 et 13 g/litre quand il est évalué par la méthode classique de Kjeldahl et entre 8,5 et 9,0 g/litre avec la méthode de l'analyse des acides

TABLEAU 2
Caractéristiques physico-chimiques du lait humain

Constantes	Moyennes	Valeurs extrêmes
Energie		
(kcal/litre)	690	446 - 1 192
(MJ/litre)	3 127	1 876 - 4 989
Densité spécifique	1,031	1,026 - 1,037
pH à 20°C	7,01	6,40 - 7,60
Matières sèches *(g/litre)*	129	100 - 175
Cendres totales *(g/litre)*	2,02	1,60 - 2,66
Point de congélation *(°C)*	–0,530	–0,519 - –0,550
Indice de réfraction *(nD20)*		1,347 - 1,348
Osmolarité (basée sur point de congélation) *(mOsm/kg)*	293	290 - 296
Viscosité à 25°C *(centipoises)*		1,628 - 1,693
Tension superficielle à 25°C *(dynes/cm)*	49	48 - 50
Indice de réfraction des graisses *(nD40)*		1,457 - 1,458
Point de fusion des graisses *(°C)*	32	
Diamètre moyen des micelles de caséine *(nm)*	42	40 - 45

Source: Lentner, 1981

aminés totaux. Ce taux est proche de 9,6 g/litre quand la méthode de l'azote non dialysable est utilisée.

Ces protéines constituent un ensemble partagé en deux grandes fractions d'après leur précipitation en milieu acide à pH 4,6. La fraction des caséines coagule dans ces conditions tandis que les autres protéines restent solubles (protéines sériques ou protéines du lactosérum). Ces dernières représentent les deux tiers environ des protéines totales du lait humain. Ce partage permet de définir un quotient formé par le rapport entre protéines solubles et caséines. Il est voisin de 65:35, voire 70:30 et même, pour quelques auteurs, de 80:20. Certaines protéines sériques (immunoglobulines) ne relevant pas de l'apport nutritif, le rapport pourrait être en termes nutritionnels fixé à 40:60, les caséines étant presque totalement assimilables.

TABLEAU 3
Composition protéique du lait humain (g/litre)

Protéines	Moyennes	Valeurs extrêmes
Protéines totales	10,60	7,30 - 20,00
Caséines	3,70	1,40 - 6,80
Protéines solubles:	6,90	4,00 - 10,00
α-lactalbumine	3,60	1,40 - 6,00
Lactoferrine	1,50	1,00 - 3,20
Lysozyme	0,12	0,04 - 0,21
Albumine sérique	0,50	0,20 - 0,97
IgA sécrétoires	1,00	0,60 - 1,60
IgG	0,01	–
IgM	0,01	–
IgD	–	–

Source: Atkinson et Lönnerdal, 1989.

Caséines. Celles-ci sont des glycoprotéines phosphorylées séparées à l'électrophorèse et identifiées d'après leur pouvoir de migration en caséine alpha, bêta, lambda et kappa. Les caséines se constituent en micelles, ce qui les rend plus accessibles à la digestion carboxypeptidasique dans l'intestin.

Protéines solubles. Le lait écrémé débarrassé de la caséine n'est plus qu'un lactosérum qui contient encore les protéines solubles, importantes pour leurs rôles nutritionnel et immunitaire, le lactose et une partie des minéraux.

Cinq constituants majeurs sont identifiés parmi les protéines solubles du lait maternel (tableau 3). L'α-lactalbumine en représente la plus grande quantité et existe dans tous les laits qui contiennent du lactose, étant le co-enzyme de la synthétase qui catalyse la formation du lactose dans la glande mammaire.

La lactoferrine (une glycoprotéine) représente un sixième environ des protéines du lactosérum. Elle peut fixer deux atomes de Fe^{3+} et n'est saturée qu'entre 2 et 4 pour cent (Spik *et al.*, 1982). Elle joue probablement un rôle

primordial dans l'absorption intestinale du fer chez le nourrisson. Comme cette protéine n'est pas complètement dégradée au cours de la digestion et garde donc la capacité de fixer réversiblement le fer dans l'intestin, les bactéries fer-dépendantes du tube digestif sont privées d'un nutriment essentiel à leur croissance. La lactoferrine possède ainsi un pouvoir bactériostatique puissant.

Le lysozyme (ou muramidase) est une enzyme hydrolysant des liaisons glycosidiques particulières, qui interviennent notamment dans la configuration des parois bactériennes (Reiter, 1984). Le lait humain possède, grâce au lysozyme, un effet bactériolytique puissant de l'ordre de 100 à 10 000 fois plus élevé que chez nombre de mammifères.

Les quantités de lactoferrine (figure 1) et de lysozyme du colostrum sont élevées et diminuent au cours de la lactation. Les taux de lactoferrine diminuent moins vite que ceux des immunoglobulines. Les deux glycoprotéines échappent à la digestion gastrique et pancréatique et se retrouvent en grande partie dans les selles. Toutefois, selon certains auteurs, près d'un quart de ces protéines peut néanmoins être nutritionnellement utilisé (Nichols *et al.*, 1987), ce qui dans l'absolu représente des quantités appréciables.

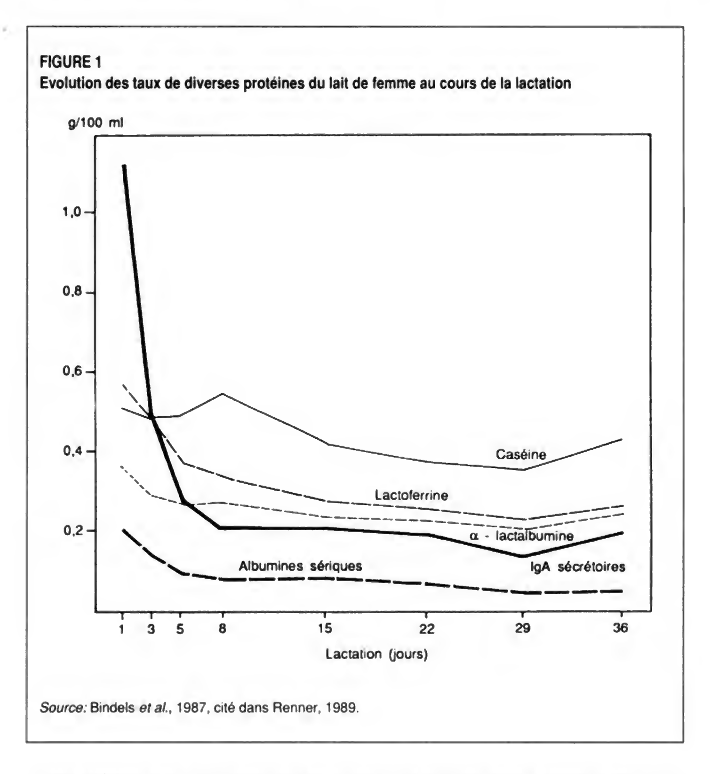
L'albumine sérique (sanguine) est aussi présente dans le lait à des taux intermédiaires entre la lactoferrine et le lysozyme.

Il existe quatre types d'immunoglobulines dans le lait (IgA, IgG, IgM et IgD). La principale d'entre elles (IgA) existe sous forme d'anticorps sécrétoire. Leurs taux diminuent en cours d'allaitement, mais restent substantiels. Les anticorps sont dirigés contre un ensemble de bactéries digestives (comme *Escherichia coli, Salmonella et Shigella*) ou respiratoires (comme *Haemophilus influenzae* et *Klebsiella pneumoniae*), de virus (cytomégalovirus, poliovirus, RSV, rotavirus, etc.), et même de parasites (comme *Giardia lamblia* et *Entamoeba histolyca*) (Hanson, 1988).

Enfin, le lait de femme ne contient pas de ß-lactoglobuline, constituant important du lait de vache.

Azote non protéique. Le lait contient de la créatinine et de la créatine, des

FIGURE 1
Evolution des taux de diverses protéines du lait de femme au cours de la lactation



Source: Bindels *et al.*, 1987, cité dans Renner, 1989.

nucléotides, des acides nucléiques et des polyamines dont les rôles sont mal connus (tableau 4).

Les acides aminés libres du lait maternel ne représentent que 8 à 20 pour cent de l'azote non protéique et dépendent de la nature de l'alimentation maternelle. Leur rôle est peu connu, mais on attribue à la glutamine (l'acide aminé libre le plus abondant) un rôle trophique sur l'intestin.

La taurine, une amine soufrée, intervient dans la conjugaison des acides

TABLEAU 4

Substances azotées non protéiques du lait humain (mg/litre)

Substances azotées	Moyennes	Valeurs extrêmes
Urée	530	350 - 810
Créatinine	20	12 - 100
Acide urique	9	–
Ammoniac	4	–
Acides aminés libres	200	65 - 300
Taurine	48	12 - 100
Carnitine	60	28 - 80
Choline	9	–
Divers:		
N-acétyl glucosamine	150	–
N-acétyl neuraminique	150	80 - 800
Oligo-peptides	–	17 - 60
Nucléotides	3	–
Polyamines	0,2	–
TOTAL	850	440 - 1 000

biliaires et joue un rôle fonctionnel au sein des photorécepteurs rétiniens (Wright et Gaull,1988).

La carnitine (dipeptide: méthionine et lysine) est présente dans le lait à des taux variables (de 35 à 90 µmol/litre) et cette teneur diminue avec le temps. Elle contribue au transport des acides gras à l'intérieur de la mitochondrie où s'effectue leur oxydation.

Enzymes impliquées dans la digestion protéique. Le lait humain contient des protéases à activité trypsinique, mais elles semblent peu actives ou naturellement inhibées (notamment par les IgA). Il existe également des antiprotéases (α-1-antitrypsine et α-1-antichymotrypsine) dont le rôle reste hypothétique (effet antiallergique ou antibactérien).

Importance nutritionnelle des protéines. A un stade de la vie où la croissance extra-utérine prend le relais de la croissance intra-utérine, l'apport en acides aminés est fondamental. Les carences quantitatives (malnutrition où la composante protéique domine) marquent leurs effets irréversibles surtout sur le système nerveux: le développement du cerveau est entravé et les capacités intellectuelles peuvent être atteintes.

Des carences plus qualitatives sont illustrées par certaines maladies congénitales du métabolisme des acides aminés ou par les régimes d'exclusion trop sévères en vue de traiter celles-ci (rôle essentiel et négligé de la tyrosine lors des premiers traitements diététiques de la phénylcétonurie, par exemple) (voir chapitre 9). Ici encore, les répercussions les plus marquées et les plus définitives portent sur le système nerveux.

Glucides

Le lactose représente l'essentiel de l'apport glucidique du lait de femme (taux moyen 70, valeurs extrêmes 49-95 g/litre) (tableau 5). Ce lait en est particulièrement riche, plus que celui de n'importe quel autre mammifère. Ainsi, 37 pour cent de l'énergie provient du lactose dans le lait de femme (contre 30 pour cent à peine dans le lait de vache). Ce disaccharide contribue pour plus de 60 pour cent au pouvoir osmotique du lait.

Le lactose pourrait être un témoin d'une régulation de la production lactée car, de tous les composants, il est l'un de ceux dont le taux varie le moins au cours de la lactation (70 g/litre avec un coefficient de variation inférieur à 4 pour cent) (figure 2). Le lactose semble favoriser l'absorption de certains minéraux (calcium, magnésium, phosphore) et d'oligo-éléments (zinc notamment). Cet effet n'est peut-être pas direct, mais dû à l'acide lactique, produit dérivé du lactose sous l'effet du métabolisme microbien. A pH acide, les sels calciques sont plus solubles et donc mieux résorbés. Le lactose, par le biais du galactose et du glucose puis de l'acide lactique produit, influence la nature de la flore microbienne intestinale. En milieu acide, la flore basophile protéolytique de putréfaction ne peut se développer. Une flore acidophile domine, apparemment de nature plutôt anaérobie (bifide).

Il existe aussi dans le lait humain (comme dans la plupart des laits) de faibles quantités de monosaccharides (fucose 2 g/litre environ) et des

TABLEAU 5
Teneurs en glucides du lait humain (g/litre)

Glucides	Moyennes	Valeurs extrêmes
Lactose	70	49 - 95
Estimé directement	68	50 - 92
Par différence	1,3	–
Fucose	0,7	0,7 - 0,8
Glucosamine	0,2	0,0 - 0,4
Inositol	0,45	0,39 - 0,56
Acide citrique	0,8	0,35 - 1,25

quantités parfois importantes d'oligosaccharides (α-glucosides jusqu'à 14 g/litre).

Systèmes enzymatiques impliqués dans la digestion glucidique. Le nouveau-né (à terme) possède une lactase au sein de la muqueuse intestinale. Il n'a pas à priori besoin d'autre enzyme hydrolytique pour la digestion des glucides en raison de la très faible teneur (environ 1,2 g/litre) de son alimentation lactée naturelle en oligosaccharides.

Ce potentiel enzymatique existe néanmoins et rend compte de la capacité des très jeunes enfants à tolérer des quantités substantielles d'amidon: l'amylase salivaire, la glucoamylase de la bordure en brosse intestinale et l'amylase mammaire (active dans des gammes larges de pH 4,5 à 7,5) participent toutes pour une part à l'hydrolyse des α-glucosides. L'existence en concentration appréciable dans le lait humain de l'amylase mammaire explique pourquoi le très jeune enfant allaité digère les farines ajoutées bien que l'amylase pancréatique ne devienne souvent active qu'après 3 à 6 mois de vie.

Importance nutritionnelle des glucides. En raison de son absorption lente, le lactose possède un effet légèrement laxatif (accélérateur de transit). Les produits de l'hydrolyse du lactose (glucose et galactose) sont absorbés

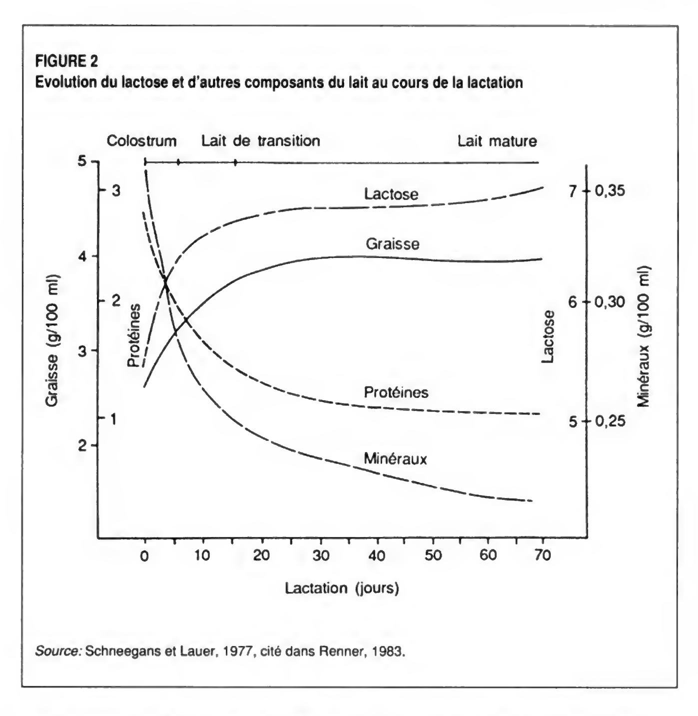


FIGURE 2
Evolution du lactose et d'autres composants du lait au cours de la lactation

Source: Schneegans et Lauer, 1977, cité dans Renner, 1983.

activement par la muqueuse intestinale, alors que tous les autres hexoses ou pentoses diffusent passivement. Certains estiment que le lactose joue un rôle dans l'absorption intestinale des acides aminés. A l'inverse du saccharose et plutôt à l'instar des amidons, le lactose est un glucide à résorption lente ou retardée. Il s'ensuit pour un apport énergétique déterminé une impression de satiété très différente selon le glucide consommé. Enfin, le lactose ne favorise pas, au contraire du saccharose, la formation de la plaque dentaire et induit donc beaucoup moins de caries.

Les oligosaccharides sont des facteurs de croissance pour les bactéries de

type bifide. Ces germes colonisent le tube digestif du nourrisson allaité et assurent la fermentation du lactose et des lactosamines en acides lactique et acétique. Le pH colique tombe à 4,5 rendant la croissance des germes pathogènes difficile. Le risque pour le nourrisson allaité de développer une entérite infectieuse est ainsi considérablement réduit. D'où un effet bénéfique sur l'état de santé et de nutrition.

Lipides

Le lait humain a une teneur élevée en lipides (45 g/litre) qui représente de 40 à 50 pour cent des calories totales. La consommation de volumes raisonnables de lait fournit au nourrisson des quantités importantes d'énergie (plus de 100 kcal/kg/jour). Les lipides apportent aussi les acides gras essentiels (linoléique et α-linolénique) qui sont des éléments constitutifs majeurs des membranes cellulaires, du cerveau notamment, et des acides gras à très longues chaînes (C20, C22, C24) (Jensen, 1989).

Triglycérides. Dans le lait humain, les graisses sont presque exclusivement des triglycérides (>98 pour cent) (tableau 6). Plus de 150 acides gras y ont été identifiés, mais quatre acides gras à chaîne longue entrent à eux seuls pour plus des deux tiers dans la composition des triglycérides: il s'agit des acides palmitique (22 pour cent), stéarique (7 pour cent), oléique (36 pour cent) et linoléique (9 pour cent) (tableau 7). Dans l'ensemble des acides gras, les composants saturés et insaturés se répartissent en parts à peu près égales alors que, dans le lait de vache, les insaturés dominent. La proportion des acides gras à chaîne moyenne (C12) est donc faible (de 1 à 5 pour cent seulement) à l'opposé de ce qu'il en est pour d'autres laits (environ 10 pour cent dans le lait de vache, par exemple).

Dans le colostrum, la matière grasse est en faible quantité et constituée surtout de triglycérides à chaînes longues polyinsaturées. Ces acides gras semblent être très rapidement incorporés dans les cellules neuronales du cerveau encore en formation et peuvent s'y maintenir pendant des temps longs.

En dehors de la période colostrale, la composition relative en triglycérides et donc en acides gras est stable par rapport aux fluctuations de la teneur

TABLEAU 6

Constituants lipidiques du lait humain et localisation dans les fractions physico-chimiques (g/100 g de matière grasse)

Constituants lipidiques	Moyennes	Localisation
Triglycérides	98	Globule gras
Diglycérides	0,7	Globule gras
Monoglycérides	Traces	Globule gras
Phospholipides	0,26	Membrane du globule gras et lactosérum
Cérébrosides	Traces	Membrane du globule gras
Stérols	0,25	Membrane du globule gras
Acides gras libres	0,4	Globule gras et lactosérum

Source: Renner, 1983.

lipidique du lait humain. Le lait est plus gras en début de tétée, le matin et lorsque la lactation progresse (moins de 40 g/litre avant 2 semaines, plus de 50 g/litre après 4 mois). Par contre, la composition en acides gras des triglycérides subit l'influence du régime alimentaire maternel. La proportion d'acide linoléique peut varier de 1 à 45 pour cent selon que la mère consomme plutôt du beurre ou des huiles (régime végétarien).

Les rares graisses de nature non triglycéridique du lait humain sont des acides gras libres, des mono- et diglycérides, des phospholipides, des sphingolipides et des esters du cholestérol.

Cholestérol. Le taux de cholestérol du lait humain est remarquable (240 mg/ 100 g de graisses)[1]. Il est élevé de 250 à 400 mg/litre dans les toutes premières semaines de la vie et diminue par la suite (après 1 mois).

Il existe enfin dans le lait des alkyl-glycérols (liaison éther) à des taux faibles, mais dont les propriétés anti-inflammatoires sont intéressantes (1 mg/g de matières grasses).

[1] Valeur à comparer à celle du lait de vache (voir chapitre 2).

TABLEAU 7

Distribution des acides gras au sein des lipides (triglycérides et phospholipides) du lait humain (%)

Acides gras	Nomenclature	Position des doubles liaisons Oméga	Moyennes
Saturés			
Caprique	C10:0	–	1,4
Laurique	C12:0	–	6,2
Myristique	C14:0	–	7,8
Palmitique	C16:0	–	22,1
Stéarique	C18:0	–	6,7
Mono-insaturés			
Myristoléique	C14:1	5	0,3
Palmitoléique	C16:1	7	3,1
Oléique	C18:1	9 (7)	35,5
Gadoléique	C20:4	9	0,9
Polyinsaturés			
Linoléique	C18:2	6	8,9
Linolénique	C18:3	3	1,0
Arachidonique	C20:4	6	0,7

Source: Jensen, 1989

Systèmes enzymatiques liés à la digestion des graisses. En raison d'une immaturité du système enzymatique digestif, le nouveau-né est peu à même de profiter de la totalité des lipides ingérés. Ainsi, les jeunes prématurés et les nourrissons présentent souvent une stéatorrhée (jusqu'à 30 pour cent des graisses ingérées) en dépit de l'existence de systèmes enzymatiques compensatoires (lipase linguale, lipase gastrique, mais surtout lipase du lait maternel, stimulée par les sels biliaires). Le lait fournit donc non seulement les lipides, mais avec eux la machinerie enzymatique qui en assure la digestion (Hamosh, 1989). Cette propriété s'observe chez tous les carnivores et n'est pas spécifique des primates.

Il existe aussi dans le lait humain une lipoprotéine lipase (à des taux extrêmement faibles) activée uniquement par des facteurs plasmatiques sanguins (héparinoïdes).

Importance nutritionnelle. Le rôle des lipides n'est pas seulement d'assurer à l'organisme une part majeure de ses besoins en énergie. A titre qualitatif, les lipides fournissent un ensemble d'acides gras essentiels qui soit entrent de plain-pied dans des métabolismes plus fondamentaux (prostaglandines, leucotriènes, etc.), soit participent à la construction de structures tissulaires nobles (cérébrosides, gangliosides). Le tableau clinique des carences en acides gras essentiels est suffisamment caractéristique pour qu'un apport minimal en acide linoléique fasse partie des recommandations de la plupart des sociétés de nutrition.

Vitamines liposolubles

Alors que le lait humain semble répondre très sûrement aux besoins en macro-nutriments du jeune enfant, il n'assure pas toujours un apport adéquat pour d'autres substances: les vitamines et les oligo-éléments. Un risque existe en particulier pour la vitamine K mais, de fait, pour toutes les vitamines liposolubles (tableau 8).

La vitamine K est présente dans le lait humain, mais à des taux faibles en regard des besoins infantiles. La flore digestive du nourrisson peut pallier cette carence relative en produisant des quantités appréciables de vitamine K. Les nouveau-nés restent cependant exposés aux dangers d'une carence aussi longtemps que leur tube digestif n'a pas été colonisé par une flore commensale adéquate et il semble que le lait de femme favorise plutôt le développement bactérien de lactobacilles, mauvais producteurs de la vitamine K.

La vitamine A est présente dans le lait de femme essentiellement sous forme de rétinol ou plutôt de rétinyl-esters. Le colostrum et le lait mature en sont relativement riches puisque la teneur oscille entre 1 300 et 2 000 UI/litre [2]. Ces taux semblent influencés par le régime alimentaire maternel, bien

[2] Une unité internationale de vitamine A correspond à 0,3 µg de rétinol cristallisé.

TABLEAU 8

Concentrations en vitamines du lait humain (mg/litre)

Vitamines	Moyennes
Vitamines hydrosolubles	
B_1 (thiamine)	0,16
B_2 (riboflavine)	0,43
B_6 (pyridoxine)	0,11
B_{12} (cobalamine)	0,0001
Acide nicotinique	1,72
Acide folique	0,0014
Acide pantothénique	1,96
Biotine	0,0006
Choline	90
Inositol	390
C (acide ascorbique)	43
Vitamines liposolubles	
A (rétinol)	0,53
ß-carotènes	0,27
D (calciférol)	Traces
E (tocophérol)	5,60
K	0,010

Source: Lentner, 1981.

que certains auteurs estiment qu'ils dépendent surtout des réserves hépatiques du nourrisson.

L'activité vitaminique D du lait humain revient à un ensemble composite de substances chimiques organiques (liposolubles et hydrosolubles). La teneur en vitamine D liposoluble est faible (20 UI ou 0,50 µg/litre). On trouve, par contre, dans le lait de femme, deux substances sulfatées hydrosolubles, le 25-hydroxy-ergocalciférol et le 25-hydroxy-cholécalciférol, dans un rapport entre elles de deux tiers/un tiers. Ces deux substances, regroupées sous le terme générique 25-hydroxy-vitamine D (25-OH-D),

représentent à elles seules de 30 à 70 pour cent de l'activité vitaminique D totale. En raison de ces grandes variations en termes d'activité, un apport de sécurité de 300 UI/jour reste recommandé pour l'enfant allaité.

La vitamine E du lait humain est constituée pour plus de 75 pour cent de l'isomère α-tocophérol et s'y touve à des taux de l'ordre de 2,5 mg/litre (équivalent α-tocophérol). Ces quantités suffisent à jouer pleinement le rôle d'antioxydant.

Vitamines hydrosolubles

Apparemment, les apports de la plupart des vitamines hydrosolubles par le lait humain (tableau 8) suffisent à couvrir les besoins des nourrissons. Cependant, les taux lactés varient fortement (de 1 à 10 pour l'acide pantothénique, par exemple). Une supplémentation vitaminique maternelle permet de porter la plupart des vitamines (sauf les vitamines B_1 et B_2) à une valeur plateau dans le lait. Inversement, dans certaines circonstances (malnutrition), les taux lactés de pyridoxine (B_6), de folates (B_9) et de vitamine C peuvent tomber très bas. Il en va de même pour la vitamine B_{12} chez les mères végétariennes strictes. La carence en folates par contre est rare. Comme l'ensemble de ces vitamines jouent un rôle dans la genèse neuronale ou neurologique, leur présence dans le lait est particulièrement cruciale pour le nourrisson au sein.

Minéraux

Dans l'espèce humaine, les concentrations de minéraux varient fortement d'un lait à l'autre. A titre d'exemple, pour les éléments principaux (sodium, calcium, phosphore, chlore, etc.), les valeurs extrêmes fluctuent du simple au quadruple et ne subissent pourtant pas l'influence du régime alimentaire maternel.

Les teneurs moyennes en minéraux du lait de femme (2,0 g/litre) sont en général plus basses que celles des laits animaux (>5,0 g/litre). Cette différence tient à deux raisons: à chaque espèce correspondent des besoins dictés par une croissance propre; en outre, les concentrations faibles du lait humain sont contrebalancées par une biodisponibilité forte grâce à la

présence de substances porteuses (protéines) ou à la forme biochimique du composé.

A titre de comparaison, le rapport des teneurs entre lait maternel et lait de vache est de 1 à 6 pour le phosphore, de 1 à 4 pour le calcium et de 1 à 3 pour le sodium. Cela se traduit par une charge osmotique rénale basse (définie par la somme des osmoles d'origine protéique et minérale) pour le lait de femme (80 mOsm/litre) et nettement plus élevée pour le lait de vache (230 mOsm/litre), où intervient aussi un apport protéique élevé.

En dehors de la période colostrale, le lait humain contient peu de sodium (270 mg/litre). Cette teneur est beaucoup plus élevée dans le lait de vache (720 mg/litre). L'existence présumée d'une association entre un apport sodé élevé ou excessif au cours de l'enfance et une hypertension artérielle à l'âge adulte amène à recommander de limiter les apports sodés pendant la première année de vie.

L'homéostasie du calcium est sous l'influence de nombreux autres nutriments (phosphore, magnésium, vitamine D, lactose, lipides, etc.). La concentration calcique est faible (300 mg/litre contre 1 200 mg/litre dans le lait de vache), mais la rétention osseuse calcique du lait humain est forte (65 pour cent contre 25 pour cent pour le lait de vache). Cette bonne rétention est à mettre en relation avec la teneur phosphorée modérée du lait de femme, ce qui peut encore s'exprimer par un rapport calcium/phosphore élevé (de 2,0 à 2,2).

Le lait maternel contient peu de magnésium (40 mg/litre), mais son taux reste très constant au cours de la lactation. Ce magnésium est en grande partie lié aux protéines du lactosérum (44 pour cent) et seulement en faible proportion (de 1 à 8 pour cent) à la caséine. La moitié du magnésium est donc présent sous forme libre ou plutôt associé à des petites molécules, comme le citrate par exemple, ce qui explique sa bonne biodisponibilité.

Importance nutritionnelle. Un apport nutritif minimal (correspondant à peu près à celui fourni par le lait maternel) est nécessaire pour le sodium (>20 mg ou environ 1 mEq/kg/jour) ainsi que pour le potassium (>40 mg ou 1 mEq/kg/j).

Outre leur rôle dans la formation osseuse et dentaire, le calcium et le

phosphore jouent un rôle métabolique (catalyseur de très nombreuses réactions biochimiques pour le calcium, constituant de nombreuses protéines ou de lipides pour le phosphore «organique»). Seuls le lait et les laitages possèdent un rapport calcium/phosphore supérieur à 1 (celui de l'os et de l'émail). Le calcium et le phosphore du lait sont bien absorbés (>85 pour cent) (tableau 9) alors que, dans le règne végétal, le degré d'assimilation n'atteint qu'environ 50 à 60 pour cent. Dans ces conditions, il ne semble pas possible de couvrir les besoins en calcium et en phosphore sans consommer du lait maternel ou, à défaut, des laitages.

Oligo-éléments

D'autres minéraux (fer, zinc, cuivre, sélénium) n'existent dans le lait qu'en faibles concentrations (oligo-éléments). Il y a peu de fer (tableau 10) dans le lait de femme, comme dans tous les laits, mais les quantités varient fortement. Pourtant, les enfants allaités sont relativement rarement carencés, car l'absorption du fer du lait humain est bonne (environ 30 pour cent), de l'ordre de cinq fois plus élevée que celle du lait de vache (environ 6 pour cent). Cette caractéristique semble due à la teneur protéique et phosphorée basse, à la teneur élevée en lactose et en ascorbate et à la présence de protéines porteuses de fer (lacto-(trans-)ferrine). L'introduction de l'alimentation solide réduit les possibilités d'absorption du fer du lait maternel.

La concentration en zinc (tableau 10) varie dans d'assez larges proportions; cette quantité tend à diminuer au fur et à mesure que la lactation avance. Le lait maternel ne contient pas plus (voire moins) de zinc que le lait de vache, mais sa biodisponibilité est bien meilleure (60 contre 45 pour cent). Un ligand ou une substance porteuse pourrait être à l'origine de cette propriété, attribuée par certains auteurs à l'acide picolinique et, par d'autres, au citrate.

Les concentrations en cuivre (tableau 10) varient également beaucoup dans les laits et ne semblent pas dépendre de la consommation maternelle. Enfin, les taux de sélénium semblent deux fois plus élevés dans le lait maternel (16 mg/litre) que dans le lait de vache (8 mg/litre).

Importance nutritionnelle. Le fer est un constituant indispensable de

TABLEAU 9

Teneurs en divers minéraux du lait humain et degrés d'absorption digestive et de rétention métabolique du nourrisson

Minéraux	Lait humain mature *(mg/litre)*	Absorption *(% des apports)*	Rétention *(% des apports)*
Calcium	270-320	80-85	62-64
Phosphore	140-150	90-95	87-90
Magnésium	35-45	90-95	50

l'hémoglobine (globules rouges) et de la myoglobine (muscle strié). Ce métal joue un rôle majeur de transporteur d'oxygène.

Le zinc et le cuivre sont des constituants essentiels d'un grand nombre d'activités enzymatiques. Un apport en zinc insuffisant est un facteur limitant la croissance. Une telle situation peut survenir si le lait en est déficient. Cette éventualité peut se rencontrer chez des mères (poly-) carencées souffrant de malnutrition.

Le cuivre est véhiculé dans la circulation par la céruloplasmine, enzyme qui exerce une activité ferroxydasique. La carence en cuivre se manifeste de ce fait par une anémie réfractaire au traitement martial et a d'autres retentissements: défaut de pigmentation, anomalies des cheveux, sécheresse de la peau, déficit partiel de l'immunité. Ces manifestations sont la conséquence de dérèglements de divers cupro-enzymes.

Le sélénium est un constituant essentiel de l'enzyme glutathion-peroxydase (protection contre les radicaux libres) et de l'enzyme de conversion des hormones thyroïdiennes.

L'iode est essentiel pour le fonctionnement de la glande thyroïde (75 μg/jour).

Hormones

Le lait humain contient de nombreuses hormones: prolactine, somatostatine, hormone de croissance et hormone somatotrope correspondante, hormones thyroïdiennes, TSH et TRH, stéroïdes, insuline, etc. Leur action est très vraisemblable, mais leur rôle est mal connu. Pour certaines d'entre elles,

TABLEAU 10
Teneurs en oligo-éléments du lait humain (µg/litre)

Oligo-éléments	Moyennes
Aluminium	500
Arsenic	50
Baryum	40
Bore	80
Brome	–
Cadmium	14
Chrome	40
Cobalt	12
Cuivre	380
Fer	660
Fluor	50
Iode	80
Manganèse	20
Molybdène	2
Nichel	25
Plomb	30
Sélénium	20
Silicium	700
Strontium	100
Titane	100
Vanadium	7
Zinc	2 430

Source: Renner, 1983 et 1989.

telles que les hormones thyroïdiennes, on considère que, malgré leur présence dans le lait maternel, la secrétion endogène reste indispensable.

Enzymes

Outre les enzymes déjà citées aux paragraphes traitant des différents nutriments, il existe dans le lait maternel de nombreuses autres enzymes qui

jouent un rôle nutritionnel indirect. Leurs effets essentiellement antimicrobiens permettent à la muqueuse intestinale de maintenir sa surface intacte, et donc de jouer pleinement son rôle nutritif. Les plus importantes sont la lactoferrine, la lactoperoxydase, la xanthine-oxydase et, dans une mesure moindre, le lysozyme.

Casomorphines

Les exorphines (ou opioïdes dérivés des aliments) peuvent être notamment produites au cours de l'hydrolyse de la ß-caséine, tant du lait de femme que des laits d'un ensemble de mammifères (bovins, ovins) (Hamosh, Hong et Hamosh, 1989).

Les casomorphines ainsi obtenues lors de la digestion intestinale exercent une activité opioïde et peut-être une action locale de type hormonal. Les propriétés les plus marquées de ces casomorphines se manifestent sur le tube digestif (péristaltisme, flux ionique, régulation de la prise alimentaire) et le système nerveux central (action présynaptique sur les neurones dopaminergiques, effet régulateur possible sur la croissance cérébrale). Ces opioïdes auraient aussi un effet sur le psychisme de la femme enceinte et allaitante, et peut-être enfin sur la régulation respiratoire.

Acides organiques

Le lait de femme contient peu d'acide citrique (de 0,35 à 1,25 g/litre) (voir tableau 5). Celui-ci est synthétisé dans la glande mammaire à partir d'acide pyruvique et participe au système tampon du lait. Il assure, avec les minéraux (calcium et phosphate), la stabilité des complexes calcium-caséines.

L'acide N-acétyl neuraminique (ou sialique) se trouve dans le lait humain à des taux élevés (0,15 g/litre) (voir tableau 4). Sa présence est importante pour la formation des membranes neuronales cérébrales.

Les acides nucléiques et les nucléotides du lait sont nombreux. Parmi ces derniers, les composés UDP sont très présents et auraient un rôle comme facteur de croissance du *Bifidus*. Certaines études suggèrent que l'absence de nucléotides ne permettrait pas une maturation aussi rapide du système immunitaire et un développement aussi complet de la muqueuse de l'intestin

grêle (Uauy, 1989). La flore commensale digestive serait également influencée par la présence de nucléotides alimentaires. Un effet sur le métabolisme lipidique (composition des membranes en cholestérol et en acides gras à très longue chaîne) est aussi évoqué.

Eléments cellulaires

Le lait contient des globules blancs (surtout le colostrum), essentiellement des polynucléaires neutrophiles et des macrophages, possédant un pouvoir phagocytaire, mais ayant une motilité différente de celle de leurs homologues sanguins. Présents dans le tube digestif du nourrisson, ces globules blancs reprennent sans doute une fonction et colonisent les tissus muqueux intestinaux. Le lait contient aussi des lymphocytes, conservant, parfois à un degré moindre, un ensemble de propriétés habituelles des éléments sanguins.

VARIATIONS DE LA COMPOSITION

Dans les espèces animales, c'est le débit lacté qui influence le plus la composition du lait, tandis que dans l'espèce humaine, après les variations individuelles, c'est la durée de la gestation qui conditionne le plus la composition. En effet, celle-ci présente des variations interindividuelles qui, pour certaines substances (matières grasses), peuvent aller du simple au quintuple.

La composition du lait varie aussi chez un même sujet en fonction d'un ensemble de facteurs: heure de la journée (variations diurnes de l'azote, du zinc et du magnésium), début ou fin de la tétée (lipides et vitamines liposolubles), stade de lactation (protéines anti-infectieuses) (figure 1) ou saison (vitamine D).

Effet des durées de gestation et de lactation

Durée de gestation (prématurité). Les mères accouchant prématurément donnent moins de lait que celles qui donnent naissance à des nouveau-nés à terme, mais leur lait est plus riche en protéines, en moyenne de 20 pour cent environ (tableau 11). Cela correspond d'ailleurs bien au besoin de ces deux catégories d'enfants.

TABLEAU 11

Variations de la composition du lait en cours de lactation de mères ayant accouché avant terme (PT) ou à terme (T) (moyennes)

Nutriments	Type de lait	Jours de post-partum		
		3	14	28
Lactose *(g/litre)*	PT	59,6	62,1	69,5
	T	61,6	67,8	72,6
Lipides *(g/litre)*	PT	16,3	44,0	40,0
	T	17,1	34,8	40,1
Protéines *(g/litre)*	PT	32,4	21,7	18,1
	T	22,9	15,7	14,2
Energie *(kcal/litre)*	PT	514	723	701
	T	487	642	697
Sodium *(mEq/litre)*	PT	266	197	126
	T	223	110	85
Chlore *(mEq/litre)*	T	269	145	131
Potassium *(mEq/litre)*	T	185	154	150
Calcium *(mg/litre)*	T	2 140	2 580	2 490
Phosphore *(mg/litre)*	T	1 100	1 680	1 580
Magnésium *(mg/litre)*	T	250	260	250

Source: Gross, 1987.

Le taux de lactose est plus bas dans le «lait de prématuré». Pour les lipides, les variations interindividuelles sont plus marquées que celles liées à la durée de gestation.

Le «lait de prématuré» est plus riche en ions sodium et chlore, et cela indépendamment de l'effet de volume (plus le débit est bas, plus les taux ioniques sont élevés). Pour les autres minéraux, les différences sont minimes (potassium) ou inexistantes (calcium, phosphore et magnésium).

En ce qui concerne les éléments immunitaires, on observe peu de variations des immunoglobulines M et G, mais le «lait de prématuré» contient davantage d'immunoglobuline A. Cela perdure pendant au moins trois mois. On observe le même phénomène pour deux protéines anti-infectieuses, le lysozyme et la lactoferrine.

TABLEAU 12
Teneur énergétique du lait de femme dans différents pays (kcal/litre)

Pays	Mois écoulés depuis l'accouchement		
	1	3	9
Hongrie	609 ± 89	597 ± 104	–
Suède	737 ± 175	794 ± 215	833 ± 200
Guatemala	558 ± 73	564 ± 59	582 ± 83
Philippines	610 ± 114	606 ± 123	597 ± 83
Zaïre	586 ± 110	573 ± 110	619 ± 110

Source: OMS, 1987.

Durée de lactation. La teneur énergétique du lait de femme reste à peu près constante au cours de la lactation (tableau 12).

La composition en protéines des laits est qualitativement très semblable, mais quantitativement très différente au cours des derniers mois de lactation.

Le taux de matières grasses augmente entre le deuxième et le dixième jour de lactation et sans doute légèrement même au-delà (parfois jusqu'au trentième jour).

En examinant les concentrations des acides gras (en particulier des cinq plus importants qui constituent plus de 90 pour cent de la teneur totale), on note que le profil reste à peu près constant au cours de la période de lactation. Seul l'acide linoléique passe de 14 pour cent environ à un mois à près de 20 pour cent à deux mois de lactation.

Les concentrations d'électrolytes comme le sodium et le chlore, qui sont étroitement liés, diminuent lorsque la lactation avance. Le stade de la lactation n'influe pas sur les concentrations des autres minéraux.

Les taux de zinc, de cuivre et de manganèse tendent à diminuer avec le temps. Celui de manganèse tend toutefois à augmenter en cas d'allaitement prolongé (supérieur à 6 mois).

Effet du régime alimentaire de la mère

De manière générale, la malnutrition protéoénergétique affecte plus la

TABLEAU 13
Variations de la composition de laits de mères en fonction de l'état de nutrition

Communautés	Lipides *(g/litre)*	Lactose *(g/litre)*	Protéines *(g/litre)*	Calcium *(mg/litre)*
Bien nourries				
Etats-Unis	45,0	68,0	11,0	340
Royaume-Uni	45,8	69,5	11,6	299
Alexandrie, Egypte (bonne santé)	44,3	66,5	10,9	–
Brésil (statut économique élevé)	39,0	68,0	13,0	208
Mal nourries				
Inde	34,2	75,1	10,6	342
Afrique du Sud (bantoue)	39,0	71,0	13,5	287
Brésil (statut économique bas)	42,0	65,0	13,0	257
Ibadan, Nigéria	40,5	76,7	12,2	–
Pakistan	27,3	62,0	8-9	284
Chimbu, Nouvelle-Guinée	23,6	73,4	10,1	–

Source : Goldman et Goldblum, 1985.

production lactée que la qualité du lait. Même en situation de carence protéique extrême (Kwashiorkor maternel), l'essentiel des composants du lait (lactose, matières grasses et azote total) se trouve non modifié (tableau 13). Cela se vérifie aussi pour les composants anti-infectieux du lait (IgA sécrétoires, lactoferrine, lysozyme), qui se maintiennent à des taux normaux, voire légèrement accrus (lysozyme) en situation nutritionnelle critique.

La consommation de matières grasses se reflète dans le lait de la mère allaitante: on trouve davantage de précurseurs de l'acide arachidonique chez des mères végétariennes. Les taux lactés en oligo-éléments (zinc, cuivre, sélénium, fer et iode) sont en partie tributaires des habitudes de consommation alimentaire maternelle (fibres).

La consommation maternelle en vitamines influence certains taux lactés.

Un apport en vitamine K, par exemple, s'accompagne d'une augmentation immédiate dans le lait. Il n'est par contre pas possible de manipuler les teneurs en vitamine D du lait par l'intermédiaire du régime alimentaire de la mère.

Effet de la prise de médicaments

Au fil des années, la liste des médicaments susceptibles de se retrouver dans le lait humain ne cesse de s'allonger. Certaines médications (cocaïne, cyclosporine, ergotamine, lithium, phénindione, etc.) sont contre-indiquées en période d'allaitement, car ces substances sont toxiques pour le nourrisson. Il en va de même pour des drogues (amphétamine, héroïne, phénylcyclidine, etc.) dont l'usage est illicite.

Lors de l'administration à la mère allaitante de radioéléments (gallium 67, iode 131), l'allaitement maternel doit être arrêté pour un temps souvent court. Cette durée est fixée d'après la demi-vie du radioélément impliqué.

Bon nombre de médicaments dont l'usage est habituel doivent être prescrits avec circonspection, car les répercussions lointaines de leur emploi prolongé sur l'enfant, mal connues, peuvent ne pas être négligeables.

Effet de facteurs d'environnement

Le lait maternel est l'ultime maillon d'une chaîne alimentaire. C'est tout au long de cette chaîne que peut se produire une contamination par des toxiques, soit des produits de synthèse chimique, soit des substances naturelles concentrées par l'homme (métaux, sources de rayonnement). Ces produits proviennent de l'activité humaine (rejets industriels et domestiques, insecticides). L'exposition aux substances toxiques peut être chronique (polluants) ou accidentelle (explosion nucléaire, catastrophe écologique).

Un ensemble de substances chimiques a été mis en évidence dans le lait maternel, mais seul un petit nombre d'entre elles s'y retrouvent de manière répétée ou durable. Il s'agit essentiellement des substances lipophiles. Les polluants accumulés dans les tissus adipeux sont d'ordinaire des substances préalablement ingérées à petite dose, mais de façon chronique; leur dégradation par l'organisme est faible ou leur conversion métabolique donne naissance à une autre substance souvent chimiquement proche (transforma-

tion du DDT en DDE par le foie). Leur élimination spontanée étant lente, ces polluants très liposolubles finissent par s'accumuler dans le tissu adipeux, d'où ils sont mobilisés avec les lipides (amaigrissement volontaire rapide, utilisation des lipides endogènes pour la lactation). C'est pourquoi leur concentration exprimée en unités par 100 g de matière grasse peut être de 20 à 30 fois supérieure à leur concentration mesurée par 100 ml de lait (Rogan, Bagniewska et Damstra, 1980).

Organohalogènes. On distingue, dans ce groupe de substances, trois classes de polluants majeurs: les pesticides organochlorés, les polychlorobiphényles (PCB) et la famille des dioxines et benzofuranes. Ce dernier groupe ne constitue pas un ensemble de substances de synthèse à proprement parler: il s'agit plutôt d'«impuretés de synthèse» générées involontairement lors de la production des pesticides organochlorés, et très toxiques.

Pesticides organochlorés. Leur nature de pesticide implique un usage dispersif, donc répandu et difficile à maîtriser. Leur présence dans le lait maternel (DDT) a été stigmatisée au cours des années 70 et signalée à l'échelle universelle à des taux fort variables. Il en est de même pour le produit de conversion du DDT, le DDE, dont l'organisme ne se débarrasse que lentement, notamment via la sécrétion lipidique du lait maternel. A titre d'exemple, un nourrisson strictement allaité ingérera pendant 6 mois (avec les 4,5 kg de graisses lactées ainsi consommées) environ 29 mg de DDE en Hongrie, 14 mg au Guatemala, 4 mg au Philippines et en Suède, et 3 mg au Zaïre (OMS, 1987).

La vérité exige qu'on précise que nul ne sait si ces quantités sont vraiment toxiques et nuisibles pour l'enfant. A vrai dire aucun cas d'intoxication infantile imputable au lait de femme ne semble avoir été rapporté avec certitude à ce jour. Il n'en faut pas moins sous-estimer les risques: le DDT est en soi un toxique, mais à des doses élevées et en consommation aiguë. Une ingestion de 16 à 282 mg/kg (soit de 1 à 20 g pour un adulte de 70 kg) a donné lieu à des accidents, mais non mortels.

D'autres organochlorés doivent être cités: la dieldrine, l'heptachlorépoxide ainsi que le lindane et ses dérivés. Leur toxicité est ici bien établie, toute

exposition grave pouvant entraîner des convulsions subintrantes et la mort. Chez ceux qui en réchappent, des troubles hépatiques fonctionnels sont décrits.

Actuellement, les pesticides organophosphorés sont utilisés en agriculture intensive et l'utilisation des pesticides organochlorés est interdite. La circulation de ces substances dans notre écosystème n'est donc pas interrompue, suite à leur usage passé et massif et à leur dispersion, encore de nos jours, dans un grand nombre de pays en développement. C'est pourquoi la prudence reste de mise et divers organismes (OMS, Food and Drug Administration) ont établi des seuils de sécurité fixant le maximum de la consommation acceptable pour ces produits (tableau 14). Ces valeurs se trouvent être de 100 à 1 000 fois plus basses que les quantités aiguës jugées toxiques. L'ingestion occasionnelle qui dépasse par exemple de deux ou trois fois ce seuil de sécurité n'est donc pas forcément dangereuse.

Polychlorobiphényles (PCB). Ces produits (isolants) ont été très utilisés dans les pays industrialisés. Leur production est censée être abandonnée, mais leur existence (transformateurs) et leur élimination progressive reste une cause de souci. Leur présence dans le lait humain est le fait d'un nombre limité d'isomères, mais les concentrations mesurées dans le lait des mères belges en 1977, 1982 et 1987 restent étonnamment stables.

Dioxines et furanes. Une polémique sur le degré de toxicité de ces substances (aussi présentes dans le lait humain) persiste dans la littérature médicale, empêchant d'affirmer nettement l'ampleur du risque lié à leur ingestion et notamment de savoir s'il existe, pour ces substances, un taux «admissible». Quoiqu'il en soit, un grand nombre des risques sont associés à l'exposition à ces substances. Il faut citer en premier une incidence accrue de cancers et de malformations fœtales, ainsi que l'acnée chlorée décrite à Seveso, en Italie, après l'accident survenu en 1976 (Roberts, 1991a et b).

Métaux lourds. Le méthylmercure (produit de l'action bactérienne convertissant le mercure métal), le cadmium et le plomb ingérés avec la viande ou le poisson traversent la barrière placentaire durant la grossesse (peu pour le

TABLEAU 14

Doses journalières admissibles ou tolérables des différentes substances organohalogènes et métaux établies par différents organismes

Substances (Organismes et années)	*µg/kg de poids corporel*	Dose journalière
BPC (DGPS	1*	Tolérable temporaire
DDT (total) (OMS, 1984)	20	Admissible
HCB γ BHC (OMS, 1989)	8	
T-HCH (OMS, 1977)	10	Admissible
Oxychlordane t-nonachlore (OMS, 1982)	1	Admissible temporaire
Epoxyde d'heptachlore (OMS, 1991)	0,1	Admissible
Aldrine et dieldrine (OMS, 1977)	0,1	Admissible
Plomb (OMS, 1993)	25	Tolérable temporaire
Cadmium (OMS, 1993)	7	Tolérable temporaire

* Ce niveau a été proposé, mais n'a pas été établi.

cadmium) et se retrouvent ensuite en partie dans le lait humain. Le taux de plomb du lait est environ 10 fois inférieur au taux sanguin maternel. En pratique, les teneurs mesurées au cours d'études conduites aux Etats-Unis et au Canada restent bien en deçà des normes journalières établies par l'OMS (plomb: 25 µg/kg de poids corporel; cadmium: 7 µg/kg de poids corporel) (décisions du JECFA, 1993)[3].

La femme et le nourrisson se trouvent ainsi tous deux à la fin d'une longue chaîne alimentaire et il est certain que les polluants atteignent le lait de

[3] JECFA: Comité mixte FAO/OMS d'experts des additifs alimentaires. Décisions prises à la 41e session tenue en février 1993.

femme davantage que les laits animaux. Rien ne permet pourtant de dire que la présence de ces polluants industriels atténue d'une manière quelconque les avantages de l'allaitement (au sein). En retour, ces allégations rassurantes ne doivent pas non plus faire relâcher les efforts de décontamination et d'assainissement du milieu environnant.

Radioactivité. L'accident de Tchernobyl (26 avril 1986) a constitué une expérience involontaire en ce qui concerne le risque de contamination radioactive de l'environnement par le césium 134 et 137 et l'iode 131. En Autriche, où les retombées semblent avoir été les plus fortes, des enquêtes ont été effectuées afin de mesurer la radioactivité (Lechner *et al.*, 1986; Haschka, *et al.*, 1987).

D'une manière générale, on a constaté une augmentatio du taux d'iode 131 dans le lait de femme durant les 2 semaines qui ont suivi l'incendie de l'usine nucléaire, cela en raison de la demi-vie brève de cet élément radioactif. Le taux du lait humain aux périodes les plus critiques n'a cependant pas dépassé le dixième à peine du taux détecté dans le lait des vaches qui broutaient directement les herbages contaminés.

Les taux de césium 134 et 137 ont augmenté progressivement dans le lait de vache au cours des 6 à 8 semaines qui ont suivi l'accident. Cette augmentation n'a pas été constatée dans le lait humain.

Effet des traitements

Les méthodes de conservation et surtout les traitements préalables (pasteurisation) auxquels le lait est soumis en vue de sa conservation jouent un rôle souvent délétère sur ses constituants protéiques. Les protéines de nature anti-infectieuse sont les plus altérées, notamment lors du traitement par la chaleur (tableau 15). Un lait traité ainsi protège moins l'état de santé du nourrisson, ce qui peut retentir sur son état de nutrition.

Importance nutritionnelle de la flore digestive associée à l'allaitement

La période infantile est la seule qui permette au régime alimentaire d'influencer la flore intestinale. L'enfant allaité est colonisé en prédominance

TABLEAU 15

Impact du traitement thermique conservateur sur le maintien des protéines du lait humain

Constituants	Pourcentage de perte		
	Traitement par la chaleur		Congélation et conservation
	(62,5 °C, 30 min.)	*(70-73 °C, 15-30 min.)*	*(-20 °C, 3 mois)*
IgA	0-33	33-100	0-3
IgG	34	97	0-Significatif
IgM	100		Significatif
Lactoferrine	0-63	94-100	0
Lysozyme	0-23	35-100	0-10
C3		100	7
Lymphocytes	100		85-100
Macrophages	22		57

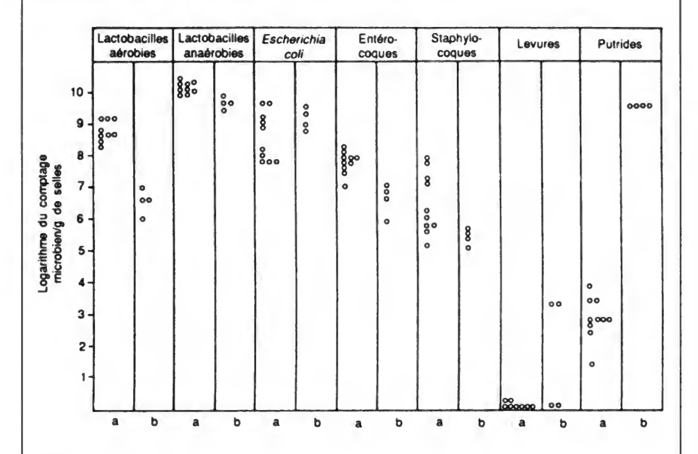
Source: Williams et Baum, 1984

par des bifidobactéries (90 pour cent), alors que l'enfant nourri au lait en poudre voit les entérobactéries prendre le dessus (figure 3). Les raisons de ces différences ont déjà été évoquées, comme les conditions de pH ou la présence en quantités substantielles de lactoferrine dans le lait maternel, par exemple.

En période néonatale, cette flore intervient largement dans la récupération colique du lactose ayant échappé à l'hydrolyse lactasique. Jusqu'à 10 pour cent du lactose alimentaire peut atteindre, intact, le colon tandis que, chez les sujets lactase déficients, cette proportion est encore plus élevée.

La fermentation colique (selon la flore en présence) permet de récupérer de 60 à 90 pour cent des disaccharides ayant échappé à la digestion intestinale. Ceux-ci sont convertis en acides gras courts volatiles et rapidement absorbés, actifs en termes énergétiques. La part d'énergie que le nourrisson et l'enfant récupèrent de la sorte n'a pas encore été précisée.

FIGURE 3
Flore fécale chez les enfants allaités (a) et nourris au biberon (b)



Source: Braun, 1981.

Chapitre 2

Laits d'animaux laitiers

INTRODUCTION

Seule la production laitière de quelques espèces de mammifères présente un intérêt immédiat en nutrition humaine, même si le lait d'autres espèces animales possède des qualités nutritives supérieures. Les quantités (rongeurs) ou l'inaccessibilité (porc) en font dans la pratique des aliments négligeables pour l'homme.

L'élevage des animaux laitiers a été orienté vers la production intensive. Les quantités récoltées par tête dépassent souvent de beaucoup les besoins nutritifs des jeunes animaux. Ces laits de ferme conservent en règle générale les caractéristiques principales du produit naturel de l'espèce sauvage. Les animaux en liberté produisent un aliment souvent plus riche: les teneurs en extrait sec dégraissé et en matière grasse sont d'ordinaire plus élevées.

La vache assure de loin la plus grande part de la production mondiale (90 pour cent), même en pays tropicaux (70 pour cent) (FAO, 1990). Ce lait est de tous le plus connu et les données qui le caractérisent sont sans doute les plus exactes. Il est logiquement aussi le produit laitier le plus consommé et étudié en nutrition humaine.

Les laits sécrétés par les différentes espèces de mammifères présentent des caractéristiques communes et contiennent les mêmes catégories de composants: eau, protéines, lactose, matières grasses (lipides) et minérales. Cependant, les proportions respectives de ces composants varient largement d'une espèce à l'autre (tableau 16).

En outre, la composition des constituants protéiques, lipidiques et minéraux peut être très différente selon l'espèce considérée (CEPIL, 1987). Ces particularités se sont vraisemblablement différenciées au cours de l'évolution et témoignent de l'aptitude de chaque espèce à couvrir les besoins nutritionnels du jeune en phase de croissance.

TABLEAU 16
Constituants principaux des laits de diverses espèces animales (g/litre)

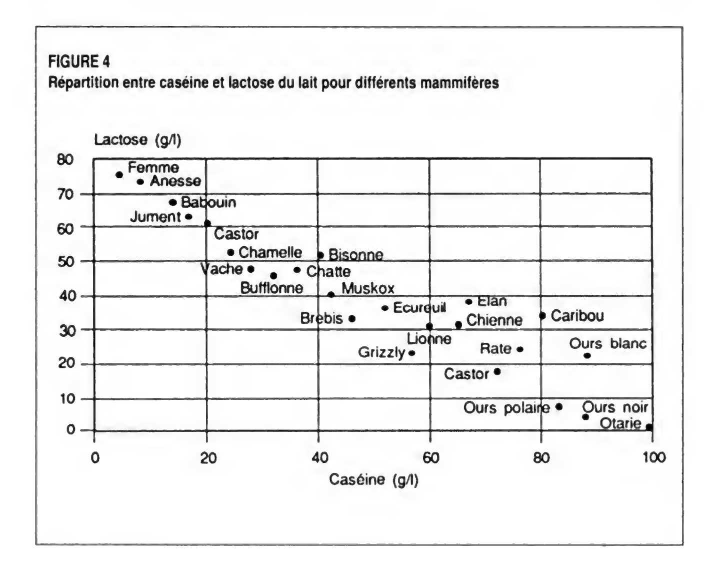
Constituants	Vache	Bufflonne	Chamelle	Jument	Chèvre	Brebis
Extrait sec total	128	166	136	109	134	183
Protéines	34	41	35	25	33	57
Caséine	26	35	28	14	24	46
Lactose	48	49	50	60	48	46
Matières salines	9	8	8	4	7,7	9
Matières grasses	37	68	45	20	41	71

Source: Compilation de diverses sources.

La croissance du nourrisson est plus lente que celle des autres mammifères, ce qui permet de comprendre que les laits de ces derniers soient plus riches en protéines et en minéraux (en calcium notamment). Ces laits ont par ailleurs moins de lactose et des concentrations assez variables en matières grasses. C'est surtout cette dernière teneur qui conditionne leur pouvoir énergétique, qui oscille entre 450 kcal/litre (jument, ânesse) et 2 500 kcal/litre (renne). Il existe une relation linéaire entre teneur en caséine et en lactose du lait (voir figure 4). Une relation semblable existe également entre teneur en lactose et en matières grasses (figure 5). Cela peut encore être exprimé comme suit: la somme des teneurs en protéines et en lactose des laits est relativement constante (de 75 à 90 g/litre).

La composition des différents laits d'animaux varie considérablement d'une espèce à l'autre, mais aussi à l'intérieur d'une même espèce, voire à l'intérieur des types ou des races d'espèces identiques. Cette variabilité peut dépendre de la nutrition, du stade de lactation, de l'âge, de l'époque de l'année et du débit lacté. Dans bien des travaux cités dans la littérature, le nombre d'échantillons analysés est limité, ce qui entraîne une certaine marge d'erreur, mais suffit pour affirmer des différences inter-espèces marquées. Enfin, les analyses du lait exigent parfois des techniques complexes, et, d'une méthode à l'autre, les résultats peuvent varier sensiblement (cas de la mesure des graisses, par exemple). Pour toutes ces raisons, la

FIGURE 4
Répartition entre caséine et lactose du lait pour différents mammifères



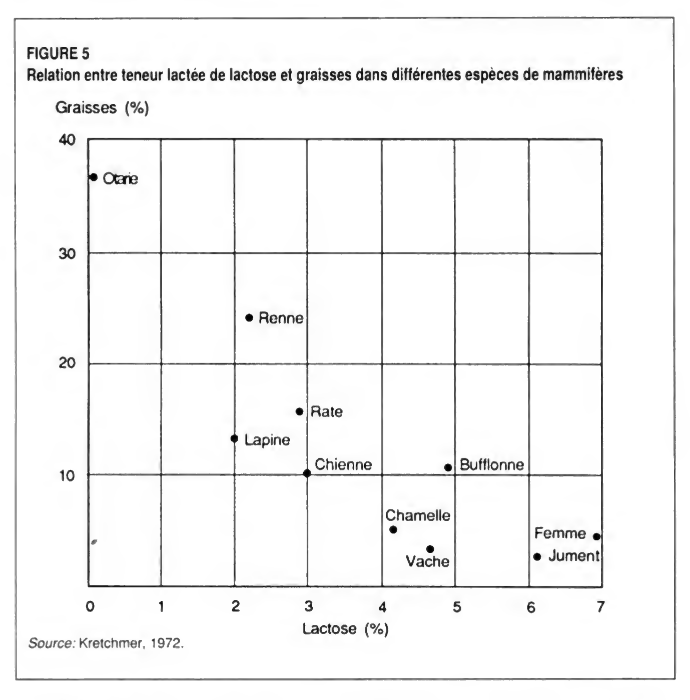
circonspection doit présider à l'examen des données sur la composition des laits animaux.

LE LAIT DE VACHE

Le lait proposé à la consommation est toujours un mélange, obtenu de la traite de plusieurs animaux. Cette pratique tend à réduire fortement l'importance des variations individuelles, mais des fluctuations notables subsistent qui sont sous la dépendance de facteurs d'ordre génétique (race), physiologique (nombre de vêlages, époque de lactation, moment de la traite), et zootechnique (mode de traite, fourrage).

Le type d'aliments fournis à la vache, par exemple, influence fortement la composition de son lait. Les rations énergétiques (dépourvues de foin ou de fourrages grossiers) ne permettent pas la production des composés

FIGURE 5
Relation entre teneur lactée de lactose et graisses dans différentes espèces de mammifères



Source: Kretchmer, 1972.

acétyls: la teneur du lait en matières grasses diminue. Les rations peu énergétiques réduisent au contraire le pourcentage d'extrait sec dégraissé. Les saisons, et donc la nature des aliments donnés au cheptel, influencent très nettement la composition du lait, et ce dans des proportions bien plus fortes que dans l'espèce humaine. Certaines caractéristiques sont cependant communes aux laits de l'espèce bovine et même plus largement aux ruminants.

Chez la vache, les aliments subissent une fermentation préalable (digestion microbienne) dans le rumen et atteignent ensuite l'estomac (ou caillet-

te) avant d'être absorbés dans l'intestin. Les bactéries du rumen hydrolysent les protéines ingérées en composés simples et reforment avec les produits de dégradation (dont l'ammoniac) de nouvelles chaînes protéiques. Ces nouveaux polypeptides serviront d'aliments à la digestion gastrique vraie. De ce fait, la valeur biologique des protéines ingérées n'a pas, chez les ruminants, l'importance qu'elle possède chez les omnivores qui puisent directement dans leurs aliments les substances azotées essentielles (acides aminés) (Blanc, 1981).

Les veaux produisent aussi les vitamines B par synthèse dans le rumen et, au contraire de l'homme, ne sont pas tributaires d'un apport alimentaire vitaminique B. Cela se traduit par une teneur faible en vitamines B des laits de vache.

Chez la vache, la digestion dans le rumen (processus de décomposition de la cellulose et de l'amidon) produit des acides gras volatils, surtout des composés acétyls, mais aussi propioniques et butyriques. L'hydrogénation des acides gras alimentaires qui sont en règle générale très désaturés dans les rations courantes, et la néosynthèse d'acides gras particuliers (à structure ramifiée ou à nombre impair d'atomes de carbone) est le propre de la biomasse microbienne. Ceux-ci sont les précurseurs directs de matières grasses particulières synthétisées dans la mamelle en proportion notable (± 10 pour cent): les acides gras à chaînes courtes et moyennes (tableau 17 qui ne sont pas présents dans le lait de femme.

Pourtant, chez le ruminant nouveau-né, le rumen est peu développé et non fonctionnel parfois pendant plusieurs semaines. Dans l'intervalle, le lait doit fournir les nutriments essentiels et le jeune veau se comporte alors comme un animal à estomac simple.

Vu sous l'angle maternel, le lait est essentiellement un produit de synthèse de la glande mammaire. Les constituants principaux, c'est-à-dire les molécules élaborées, y sont synthétisés: lactose, caséine, lipides. D'autres substances sont cependant directement filtrées du sang (chlorures). Si le lait formé n'est pas évacué, les molécules élaborées subissent une résorption et le lait obtenu (lait de rétention) présente une composition anormale. La mamelle est aussi un émonctoire où s'éliminent les substances sans valeurs nutritives ou nocives (antibiotiques, pesticides).

TABLEAU 17
Proportions des acides gras* dans la ration, le rumen et les lipides du lait de vache

Acides gras	Ration	Rumen	Matière grasse du lait
C4 à C12	–	–	26
C14	2	3	13
C16	21	20	30
C18	6	50	7
C18:1	22	16	20
C18:2	34	7	2
C18:3	14	3	1

* Pour la nomenclature des acides gras, se référer au tableau 24.

Caractéristiques physico-chimiques

Le lait présente des caractéristiques liées à sa nature biologique, à savoir: variabilité, complexité, hétérogénéité et altérabilité. Les éléments les plus constants de sa composition méritent d'être signalés en premier et, ensuite, les fluctuations rencontrées seront associées aux facteurs qui les engendrent.

Le lait de vache est un liquide opaque de couleur blanche, plus ou moins jaunâtre selon la teneur en ß-carotène de sa matière grasse. Sa saveur est douce et son odeur faible, mais identifiable. Le pH est voisin de la neutralité. Les principales constantes physiques du lait sont reprises au tableau 18.

Le lait constitue un milieu aqueux caractérisé par trois phases: une émulsion de globules gras dans un liquide qui est lui-même une suspension colloïdale de matières protéiques dans un sérum. Ce lactosérum est une solution neutre qui contient principalement du lactose et du sodium. Ces deux derniers éléments avec d'autres minéraux (potassium et chlore) présentent la caractéristique commune d'être osmotiquement actifs. Leur niveau de sécrétion par la mamelle détermine donc la sortie d'eau des cellules vers la lumière des acini sécrétoires, c'est-à-dire le niveau de production laitière.

TABLEAU 18

Caractéristiques physico-chimiques du lait de vache

Constantes	Moyennes	Valeurs extrêmes
Energie		
(kcal/litre)	701	587-876
(MJ/litre)	2 930	2 454-3 662
Densité du lait entier à 20 °C	1,031	1,028-1,033
Densité du lait écrémé	–	1,036
Densité de la matière grasse	–	0,94-0,96
pH à 20°C	6,6	6,6-6,8
Acidité titrable *(°Dornic)*[a]	16	15-17
Point de congélation *(°C)*	–	–0,520-0,550
Chaleur spécifique du lait entier à 15 °C	0,940	–
Chaleur spécifique du lait écrémé à 15 °C	0,945	–
Tension superficielle du lait entier à 15 °C *(dynes/cm)*	50	47-53
Tension superficielle du lait écrémé à 15 °C *(dynes/cm)*	55	52-57
Viscosité du lait entier à 20 °C *(centipoises)*	2,2	–
Viscosité du lait entier à 25 °C *(centipoises)*	1,8	1,6-2,1
Viscosité du lait écrémé à 20 °C *(centipoises)*	1,9	–
Conductivité électrique à 25°C *(siemens)*[b]	45×10^{4}	$40 - 50 \times 10^{-4}$
Point d'ébullition *(°C)*	–	100,17-100,15
Potentiel d'oxydoréduction	0,25 V	+0,20-+30
Point de fusion des graisses *(°C)*	36	26-42

[a] 1°D = 0,1 g d'acide lactique/litre.
[b] Autrefois mhos
Source: Alais, 1984.

Valeur énergétique et composition moyenne

La teneur énergétique du lait de vache oscille habituellement entre 650 et 720 kcal/litre, et dépend surtout de la teneur en matières grasses (Blanc, 1981; Lentner, 1981; Renner, 1989).

Le lait est composé de:

TABLEAU 19
Composition moyenne des principaux constituants du lait de vache (g/litre)

Constituants	Moyennes
Matières azotées	34
Lactose	48
Matières salines	9
Extrait sec dégraissé	91
Matières grasses	37
Extrait sec total	128
Eau libre (solvant) et liée	902
Lait entier	1 030

Source: Alais, 1984.

- quatre éléments majeurs: protéines, lipides, glucides et sels minéraux;
- plusieurs éléments mineurs: vitamines, oligo-éléments, gaz dissous, lécithine, enzymes, nucléotides. Certains d'entre eux jouent un rôle en raison de leur activité biologique.

Le tableau 19 donne la composition moyenne des éléments majeurs du lait de vache.

Matières azotées et protéines

Les matières azotées, protides ou protéines du lait constituent un ensemble complexe (Withney *et al.*, 1976) dont la teneur totale avoisine 35 g/litre. Ce taux est élevé en comparaison des quantités présentes dans le lait de femme (environ 12 g/litre).

Les protéines représentent 95 pour cent environ des matières azotées et sont constituées soit d'acides aminés seulement (ß-lactoglobuline, α–lactalbumine), soit d'acides aminés et d'acide phosphorique (caséines α et ß) avec parfois encore une partie glucidique (caséine κ). Une vingtaine d'acides aminés interviennent dans la composition de ces protéines, leur séquence conférant à chaque protéine des propriétés propres. C'est sur la base de la précipitation à pH 4,6 (20°C) qu'on sépare deux constituants: la

TABLEAU 20

Composition moyenne et distribution des protéines du lait de vache

Protéines	Moyennes absolues *(g/litre)*	Moyennes relatives *(%)*
Protides totaux ou matières azotées totales	34	100
Protéines	32	94
Protéines non solubles ou caséine entière:	26	82
Caséine α	12,0	46
Caséine ß	9,0	35
Caséine κ	3,5	13
Caséine γ	1,5	6
Protéines solubles:	6	18
ß-lactoglobuline	2,7	45
α-lactalbumine	1,5	25
Sérum-albumine	0,3	5
Globulines immunes	0,7	12
Protéoses peptones	0,8	13
Substances azotées non protéiques	2	6

Source: Renner, 1983.

ou plutôt les caséines (α S, ß, γ, et κ) et les protéines solubles ou protéines du lactosérum (tableau 20) (Dalgleish, 1982).

En outre, il existe dans le lait une fraction dite protéose-peptone qui présente des caractéristiques intermédiaires. Cette fraction est riche en glucides (11 pour cent de sa composition) et ne précipite pas comme les autres protéines solubles lors du chauffage à 100 °C suivi d'une acidification à pH 4,6. Cependant, cette fraction protéose-peptone fait partie des protéines sériques. Comme le lait humain, le lait de vache contient une fraction azotée non protéique (environ 5 pour cent), mais en valeur absolue elle est plus faible (0,15 g N/litre) (Alais et Blanc, 1975).

Caséines. La caséine entière (groupe protéique qui précipite à pH 4,6 à 20°C) représente environ 80 pour cent des protéines totales du lait de vache (contre 30 pour cent dans le lait humain). Les caséines sont des polypeptides phosphorés associés surtout à des constituants minéraux, en particulier le calcium, mais aussi le phosphate, le magnésium et le citrate, de manière à

former des micelles de phosphocaséinate de calcium. En mélange, elles constituent entre elles des complexes qui ne réunissent en l'absence de calcium qu'un petit nombre de molécules. En présence de calcium, le degré d'association est très élevé et les unités formées agrègent plusieurs milliers de molécules, constituant les micelles de caséine native dispersées dans la phase hydrique du lait (diamètre variant de 100 à 250 µm). Cette configuration spatiale permet aux enzymes hydrolytiques (carboxypeptidases) une digestion plus aisée.

Les caséines ont un caractère acide marqué. Sur gel de polyacrylamide, on peut séparer quatre composants principaux au sein des caséines: α (α S0, α S1, α S2), ß, κ et γ. La composition moyenne des micelles de caséine bovine (constituants protéiques ou minéraux est donnée au tableau 21).

On observe, par ailleurs, des variations génétiques (substitution d'un ou de plusieurs acides aminés) au sein même de l'un ou l'autre sous-groupe des caséines α. Ce polymorphisme génétique a des retentissements tant en physiologie animale et humaine qu'en technologie fromagère, puisqu'il conditionne par exemple la vitesse d'acidification du lait et la texture du caillé. Il dépend lui-même du polymorphisme de la ß-lactoglobuline qui conditionne directement le taux de cette protéine, mais qui influe aussi sur le taux de caséine et de matière azotée. En diététique pédiatrique, on sait l'importance que prend la qualité du caillot (grossier avec le lait de vache, finement floculé avec le lait humain) sur la vitesse de la vidange gastrique et du transit intestinal. De la même manière, la digestion peptidique (hydrolyse) génère des fragments peptidiques dont certains semblent responsables d'activités physiologiques (Coste et Tome, 1991) (voir Chapitre 1, page 24). Ainsi, l'ensemble de ces caractéristiques physico-chimiques conditionnent en partie la digestibilité du lait (Adrian, 1973; Bernier, Adrian et Vidon, 1986).

Protéines solubles ou protéines du lactosérum. Les protéines solubles représentent environ 20 pour cent des protéines totales du lait de vache (alors que, dans le lait maternel, plus de 70 pour cent de l'apport protéique est solubilisé dans cette fraction) (Jenness, 1979). Elles floculent difficilement en présence d'acide ou de présure. Par contre, à l'exception des protéoses-

TABLEAU 21

Composition moyenne des micelles* de caséine bovine

(g/100 g d'extrait sec)

Constituants	Moyennes
Constituants protéiques	92
Caséine αS1	33
Caséine αS2	11
Caséine β	33
Caséine κ	11
Caséine γ	4
Constituants minéraux	8,0
Ca	2,9
Mg	0,1
Ions phosphate	4,3
Ions citrate	0,5

* Teneur en eau de la micelle: 65 pour cent.
Source: Schmidt, 1980.

peptones, elles sont dénaturées par la chaleur et sont entraînées lors de la coagulation de la caséine sous l'action de la présure. Un chauffage à 80 °C pendant une minute en dénature environ 20 pour cent, mais, lors de la pasteurisation HTST (72 °C pendant 15 à 20 secondes), la dénaturation est négligeable.

Ces protéines ont une valeur nutritionnelle importante qui n'est pas modifiée par le chauffage. Cette fraction protéique est complexe et peut être classifiée comme repris au tableau 20. Son constituant essentiel (50-55 pour cent) est la ß-lactoglobuline bovine, totalement absente du lait humain. Son rôle n'est pas connu.

La deuxième protéine soluble (20-25 pour cent) du lait bovin est, par ordre d'importance, l'α-lactalbumine. Elle est présente dans le lait de tous les mammifères qui sécrètent du lactose puisque cette protéine est partie intégrante de l'enzyme de synthèse du lactose.

Parmi les protéines solubles restantes (20-30 pour cent de cette fraction),

certaines, comme la sérum albumine, ont une faible valeur nutritionnelle; d'autres comme les immunoglobulines et la lactoferrine n'en ont pas du tout.

Le taux de lactoferrine (ou lactotransferrine) est très bas dans le lait mature de vache (0,2 g/litre), mais élevé dans le colostrum bovin (5 g/litre) et à des valeurs comparables à celles du colostrum humain (de 5 à 15 g/litre). La lactoferrine bovine est nettement plus saturée en fer que la lactoferrine humaine (environ 30 pour cent contre 5 pour cent) et ce fer lié est peu biodisponible pour l'absorption digestive tant chez l'enfant que chez l'adulte (Spik *et al.*, 1982).

Les protéines du lactosérum ont une valeur nutritive majeure en nutrition humaine, car elles sont riches en acides aminés essentiels. Les teneurs en protéines des laits de vache et de femme sont sensiblement identiques, mais leur aminogramme est différent. En conséquence, lorsqu'une formule lactée adaptée au lait maternel (laits infantiles dits «à prédominance ou enrichis en lactalbumines») est choisie pour alimenter un enfant, les protéines lactosériques induisent dans le plasma du nourrisson un aminogramme tout différent de celui obtenu par l'administration d'un lait de vache non modifié.

Les protéines non nutritionnelles du lactosérum bovin se répartissent en lysozyme et en immunoglobulines sécrétoires A (dont les taux sont 500 fois plus bas que dans le lait humain) ainsi qu'en immunoglobulines G et M (dont les taux sont élevés). Ces deux derniers types d'immunoglobulines sont transmises en grandes quantités au veau durant la phase colostrale de la lactation. Celles-ci, une fois ingérées, sont passivement absorbées par l'intestin et gagnent la circulation, où elles reprennent leur rôle immunitaire.

Azote non protéique. Le taux d'urée du lait de vache est bas et ceux de taurine et de carnitine sont faibles (Rassin, Sturman et Gaull, 1978) (tableau 22).

Lipides

Les termes «matière grasse» et «lipides» ne sont pas synonymes. En effet, la matière grasse obtenue par des moyens mécaniques (produit de l'écrémage obtenu par centrifugation) représente le contenu du globule gras. De ce fait, elle ne contient pas les lipides polaires ou complexes (phospholipides,

TABLEAU 22

Composition moyenne de l'azote non protéique du lait de vache

Substances azotées	Concentration *(g/litre)*	Teneur azotée non protéique *(g N/litre)*
Urée	0,18	0,12
Créatine	0,04	0,01
Créatinine	0,005	0,0025
Acide urique	0,023	0,0076
Ammoniac	0,007	0,0067
α-aminé	0,06	0,05
Taurine	0,05	0,07
Dérivés aminés:		
Carnitine (libre et acylée)	0,01	0,01
Choline		0,03
Acide orotique	0,067	
Acide neuraminique	0,150	0,02
Dérivés glucidiques	0,26	
Dérivés phospholipidiques	0,07	0,02

Source: Jenness, 1974.

etc.), mais contient, par contre, des composés liposolubles qui ne sont pas des lipides au sens strict et que l'on nomme «substance lipoïdique». Il s'agit essentiellement d'hydrocarbures (dont le carotène), d'alcools (dont le cholestérol), de tocophérols (vitamine E) et de vitamines liposolubles (A, D, K). Cette fraction lipoïdique (encore appelée insaponifiable) regroupe donc des composés variés et nombreux qui, en raison de leur importance et de leur rôle, seront envisagés séparément, même s'ils ne représentent pas même 1 pour cent de la matière grasse totale du lait.

Les lipides (fraction saponifiable) constituent donc l'essentiel de la matière grasse (>98 pour cent). Le tableau 23 détaille à la fois la teneur (par 100 g de matière grasse) et la (ou les) localisation(s) principale(s) des lipides du lait.

TABLEAU 23

Constituants lipidiques du lait de vache et localisation dans les fractions physico-chimiques (g/100 g de matière grasse)

Constituants lipidiques	Proportions	Localisation
Triglycérides	96-98	Globule gras
Diglycérides	0,3-1,6	Globule gras
Monoglycérides	0,0-0,1	Globule gras
Phospholipides	0,2-1,0	Membrane du globule gras et lactosérum
Cérébrosides	0,0-0,08	Membrane du globule gras
Stérols	0,2-0,4	Globule gras Membrane du globule gras et lactosérum
Acides gras libres	0,1-0,4	Membrane du globule gras et lactosérum
Esters du cholestérol	Traces	Membrane du globule gras
Vitamines	0,1-0,2	Globule gras

Source: Renner, 1983.

Les lipides, notamment les acides gras secrétés par la mamelle, ont une double origine: ils proviennent pour 60 pour cent en poids des acides gras longs sanguins et, pour le reste, d'une synthèse de novo par les cellules mammaires, à partir de précurseurs à deux ou quatre atomes de carbone.

De tous les composants du lait de vache, les lipides sont ceux qui, quantitativement et qualitativement, varient le plus. Les taux moyens précisés dans la littérature (35 g/litre) peuvent être retenus en pratique industrielle lorsque le lait est un mélange provenant de plusieurs animaux.

Globules gras. Hormis quelques rares phospholipides, stérols et acides gras présents dans le lactosérum, les graisses sont dispersées dans le lait sous forme de globules sphériques au nombre de 1,5 à 4,6 10^{12} par litre; leur diamètre moyen se situe entre 3 et 5 microns. Ces globules sont limités par une membrane formée d'une quinzaine de polypeptides (à raison de 40 %), de triglycérides (à raison de 35 %) et de lipides complexes (phospholipides, stérols, cérébrosides, à raison de 15 % environ). La membrane lipoprotéique confère au globule gras sa stabilité. De fait, elle est fragile et sa rupture

(agitation, réfrigérations répétées, acidification) déstabilise l'émulsion avec libération de matière grasse. Celle-ci peut subir alors une lipolyse due à l'action des lipases membranaires ou microbiennes. Par contre, lors de l'homogéinisation du lait, le nombre de globules gras augmente et surtout leur diamètre diminue très sensiblement (moins de 1 micron). De ce fait, la surface de contact augmente encore de 20 fois environ. Cette modification prévient la remontée de la matière grasse (dans les laits de longue conservation) et favorise sa digestion.

Pour certains auteurs, les globules gras, surtout ceux de petit diamètre, peuvent traverser intacts la paroi intestinale et via les lymphatiques atteindre les cellules de l'organisme en court-circuitant le foie. Cependant, si l'émulsion est cassée et les globules détruits, les lipides ne peuvent être digérés sans être au préalable mis en émulsion par les sels biliaires, puis hydrolysés par les lipases et enfin absorbés.

La composition lipidique du lait regroupe deux entités: les lipides simples (les glycérides) et les lipides complexes (phospholipides).

Lipides simples

Structure. Les lipides simples sont essentiellement constitués de (tri-) glycérides (98 pour cent de la matière grasse) avec, en faibles quantités, des stérides et des cérébrosides ou cérides. Les glycérides (lipides neutres) sont constitués par des triglycérides (plus de 98 pour cent), des diglycérides (de 0,2 à 1,5 pour cent) et des monoglycérides (traces) (tableau 23). Pondéralement, les acides gras glycéridiques représentent près de 90 pour cent de la matière grasse.

Si plus de 400 composés ont été identifiés dans le lait de vache, 15 d'entre eux seulement sont présents en quantités notables dans le lait (>1 pour cent des lipides totaux).

Les acides gras saturés, à nombre pair de carbone, dominent très largement puisqu'ils représentent à eux seuls près de la moitié des acides gras (tableau 24). De fait, 34 pour cent des triglycérides ne contiennent que des acides gras saturés, 39 pour cent un seul insaturé, 25 pour cent deux insaturés et 2 pour cent seulement trois insaturés.

Les acides saturés de faible poids moléculaire (C4-C12), notamment les

TABLEAU 24

Distribution des principaux acides gras de la graisse du lait de vache (%)

Acides gras	Nomenclature	Moyennes
Saturés		
Butyrique	C 4:0	3,6
Caproïque	C 6:0	2,3
Caprylique	C 8:0	1,3
Caprique	C10:0	2,7
Laurique	C12:0	3,3
Myristique	C14:0	10,7
Pentadécanoïque	C15:0	1,2
Palmitique	C16:0	27,6
Stéarique	C18:0	10,1
Arachidique	C20:0	0,2
Monoinsaturés		
Myristoléique	C14:1	1,4
Palmitoléique	C16:1	2,6
Oléique	C18:1	26,0
Polyinsaturés		
Non conjugués:		
Linoléique	C18:2	2,5
Linolénique	C18:3	1,4
Arachidonique	C20:4	0,3
Conjugués:		
Diène	C18:2	0,8
Polyènes	C18,20,22: 3 et 4	Traces

Source: Alais, 1984.

acides gras courts C4 et C6, sont présents en quantités modestes (de 8 à 9 pour cent des acides gras totaux), mais nettement supérieures à celles trouvées dans n'importe quelle autre graisse animale ou végétale.

Les acides gras insaturés sont très variés, le plus important étant l'acide oléique (de 25 à 30 pour cent de l'ensemble des acides gras). Les acides gras polyinsaturés n'existent qu'en proportions faibles comparativement aux autres matières grasses (<8 pour cent).

Il en découle que les acides gras essentiels sont peu représentés dans le lait de vache. L'acide linoléique (C18:2) ne s'y retrouve qu'à raison de 2 pour cent contre 13 pour cent pour le lait humain.

Enfin, il convient de noter chez la vache (comme chez les autres ruminants) non seulement une richesse du lait en acides gras courts, mais aussi en acides gras mineurs (impairs et ramifiés) et, au contraire, une pauvreté extrême en acides gras très longs et polyinsaturés. La présence d'acides cétoniques et hydroxylés est encore une caractéristique de la matière grasse laitière dans l'ensemble des matières grasses alimentaires. Même si cette proportion est faible (>0,1 pour cent), leur transformation lors d'un traitement thermique (vers 120 °C) en méthylcétones et en lactones est à l'origine d'un fort pouvoir aromatique.

Digestibilité. Les propriétés digestives des lipides, tout comme leur consistance ou leur sensibilité à l'oxydation, sont influencées par la structure glycéridique (position des acides gras sur le glycérol). La position 3 est occupée préférentiellement par les acides gras les plus courts (C4 et C6). Les acides gras les plus présents en position 1 sont l'acide palmitique, l'acide linoléique et l'acide linolénique. La position 2 est occupée dans un tiers des cas par l'acide palmitique. Cette disposition des acides gras revêt une importance particulière pour la digestion. La lipase pancréatique (qui libère les sites 1 et 3) va engendrer, en agissant sur le lait humain, la formation de 2-monoglycérides riches en C16; ceux-ci sont aisément absorbés tels quels. La même activité hydrolytique agissant sur le lait de vache va permettre la libération de grandes quantités d'acide palmitique, situées sur les positions 1 et 3. Ce dernier précipite avec le calcium pour former des savons insolubles. Tant la matière grasse que le minéral sont partiellement perdus pour l'absorption digestive. Chez l'animal d'expérience, les acides gras à chaîne courte et moyenne sont oxydés beaucoup plus rapidement que les acides gras longs.

Les acides gras saturés et insaturés de même longueur sont oxydés de

manières très comparables; par contre, leur utilisation métabolique pour une longueur donnée de la chaîne est plus longue quand ils sont saturés (par exemple: 27 pour cent pour le stéarique, 14 pour cent pour l'oléique et 18 pour cent pour le linoléique). Il y a tout lieu de penser que l'être humain oxyde ou incorpore les acides gras du lait de cette manière également.

Il existe, au sein des triglycérides du lait, une quarantaine d'acides gras saturés, mono- et polyinsaturés qualifiés de «mineurs» en raison de leurs taux extrêmement faibles.

Le lait contient aussi de très faibles taux d'acides gras libres (<1 mEq/litre). Leur présence imprime au lait une saveur rance quand, sous l'effet d'une lipolyse spontanée, leur taux dépasse 2 mEq/litre, surtout s'il s'agit d'acides butyrique, caproïque et caprylique.

Des quantités parfois appréciables de corps cétoniques (de 30 à 50 mg/litre), dérivés des acides gras, peuvent apparaître dans le lait surtout en période de déficit énergétique pour l'animal, ou pendant les 2 à 3 premiers mois de lactation.

Lipides complexes. Ces lipides sont complexés avec du phosphore et/ou de l'azote. Les plus importants sont les phospholipides, qui ne représentent que 1 pour cent à peine de la matière grasse (de 0,3 à 0,5 g/litre) (tableau 23), mais jouent le rôle de constituant du globule gras et de stabilisant de l'émulsion. Leurs caractéristiques à la fois lipo- et hydrophiles leur permettent de former des ponts entre phases grasse et aqueuse. On en retrouve donc tant dans la crème (environ 60 pour cent) et le beurre que dans le lait écrémé (40 pour cent) ou le babeurre (tableau 25). Les phospholipides forment trois groupes principaux: lécithines, céphalines et sphingomyélines. Environ 85 pour cent des acides gras constituant des phospholipides sont des acides gras à chaîne longue. D'autres lipides complexes sont présents à des taux mineurs: les gangliosides, les glycolipides et les glycosphingolipides.

Stérols. Les stérols (non saponifiables) sont présents à l'état libre (>80 pour cent) ou estérifiés par des acides gras. Ils représentent de 0,3 à 0,4 pour cent de la matière grasse totale du lait (environ 0,1 g/litre). Le cholestérol en est le constituant majeur (70 mg/litre). Son taux n'accuse pas de variation

TABLEAU 25

Teneurs totales en phospholipides du lait de vache et de produits laitiers (g/litre)

Produits laitiers	Phospholipides
Lait entier	0,30-0,50
Lait écrémé	0,14-0,23
Petit lait	1,03-1,91
Crème	1,00-5,00
Beurre	1,00-2,50
Fromage	1,00-2,00

Source: Renner, 1983.

saisonnière. Le lait de femme en contient environ le double (de 150 à 200 mg/litre) (tableau 26). Les stérols entrent surtout dans la composition de la membrane lipoprotéique du globule gras (de 0,3 à 3,5 pour cent des lipides membranaires) et ils contribuent à la stabilité de l'émulsion.

L'apport en cholestérol des produits lactés est modeste en comparaison des autres matières grasses d'origine animale. Il est bon de rappeler que les végétaux contiennent surtout des phytostérols qui sont métabolisés comme le cholestérol. L'huile de palme et celle de sésame contiennent de très faibles quantités de cholestérol.

Glucides

Le lactose, disaccharide composé de glucose et de galactose, est le seul glucide libre du lait présent en quantités importantes (de 45 à 50 g/litre). Il est synthétisé par la glande mammaire au départ du glucose prélevé dans le sang. Sa faible contribution à l'apport énergétique du lait (30 pour cent), ne fait pas de ce dernier un aliment équilibré en termes de répartition calorique (les recommandations théoriques prônent un apport de 50 à 60 pour cent de calories glucidiques). Le lactose joue un rôle nutritionnel particulier (voir chapitre 1, p. 11) et intervient également comme élément de fermentescibilité. Il peut être hydrolysé par les acides forts, mais surtout par la lactase. De par sa fonction aldéhyde, il peut réagir avec diverses substances azotées.

TABLEAU 26

Teneurs en cholestérol de divers produits laitiers et d'autres aliments
(mg/100 g de matière grasse)

Produits laitiers	Teneurs en cholestérol
Lait de vache entier	13
Lait de vache écrémé	2
Lait de femme	20
Lait de chèvre	10
Lait de brebis	11
Babeurre	2
Lait condensé	30
Crème	90
Fromage	0-100
Beurre	230
Lait écrémé en poudre	20
Lait entier en poudre	100
Viande	70-90
Œuf	500
Poisson	30-70

Source: Renner, 1983.

Cette réaction, avec des résidus de lysine notamment, fait partie des réactions de Maillard (brunissement du lait chauffé à température de stérilisation classique). Le blocage par un résidu réduit la valeur biologique de la protéine. L'impact nutritionnel de cette réaction est mal quantifié.

La saveur sucrée du lactose est faible; lorsqu'on impute au saccharose une valeur arbitraire de 100 pour cent, celle du lactose atteint environ le tiers (de 27 à 39 pour cent).

Le lait contient une cinquantaine d'oligosaccharides bien répertoriés présents à l'état libre, mais en quantités souvent négligeables (0,1 g/litre).

Minéraux

Les minéraux (ou matières salines) (tableau 27) sont présents dans le lait

TABLEAU 27

Constituants majeurs des matières salines du lait de vache (g/litre)

Constituants	Teneurs moyennes
Potassium (K_2O)	1,50
Sodium (Na_2O)	0,50
Calcium (CaO)	1,25
Magnésium (MgO)	0,12
Phosphore (P_2O_5)	0,95
Chlore (NaCl)	1,00
Soufre	0,35
Acide citrique	1,80

Note: Les teneurs indiquées sont exprimées en g de cation ou de l'anion correspondant et g de sel ou de l'oxyde le plus fréquent.
Source: Alais, 1984.

(7,3 g/litre environ), soit en solution dans la fraction soluble, soit sous forme liée dans la fraction insoluble (ou colloïdale). Certains minéraux se trouvent exclusivement à l'état dissous sous forme d'ions (sodium, potassium et chlore) et sont particulièrement biodisponibles. Les autres (calcium, phosphore, magnésium et soufre) existent dans les deux fractions. Dans la fraction soluble, ils existent en partie sous forme libre (calcium et magnésium ionisés), en partie sous forme saline (phosphates et citrates) non dissociée (calcium et magnésium), ou encore sous forme complexe (esters phosphoriques et phospholipides). Dans la fraction colloïdale, les minéraux (calcium, phosphore, soufre et magnésium) sont associés ou liés à la caséine au sein des micelles.

Le calcium existe sous forme de phosphate, de phosphocaséinate et de citrate. Environ 65 pour cent du calcium se trouve au sein des micelles de caséines (fraction colloïdale) où cet ion bivalent assure un pontage entre les micelles de caséines, le tiers résiduel étant présent soit sous forme de sel (citrate, phosphate: >20 pour cent) ou même à l'état libre (calcium ionisé: >10 pour cent). Pour ce qui est du phosphore, 20 pour cent est lié aux groupements hydroxyles d'acides aminés de la caséine (sérine, thréonine), plus de 60 pour cent est présent sous forme de phosphate inorganique

(moitié lié à la caséine, moitié en solution saline) et le reste se partage entre les phospholipides et les esters hydrosolubles (figure 6). Le magnésium est essentiellement en solution (environ 70 pour cent) et une fraction seulement est liée à la caséine en suspension colloïdale.

En résumé, la fraction saline colloïdale renferme environ les deux tiers du calcium, la moitié du phosphore et le tiers du magnésium, tous ces minéraux étant plus ou moins liés à la caséine, alors que la fraction dissoute renferme quasiment tout le sodium, le chlore et le potassium, un tiers du calcium (libre ou salin), la moitié du phosphore (salin et organique soluble) et les deux tiers du magnésium salin.

Il existe un équilibre entre les formes solubles et colloïdales, d'une part, et entre les formes ionisées et non dissociées d'autre part. Cet état est précaire parce que sensible à divers facteurs, notamment au pH, à la température, et à la concentration ou à l'addition de calcium. Toute altération de ces équilibres modifie la stabilité du lait, notamment les propriétés de la caséine native. Ainsi, sa déstabilisation provoquée par le chauffage ou la présure est accentuée par une teneur calcique élevée et diminuée par une teneur calcique réduite (par des sels complexants, type citrate et phosphate). Le froid entraîne, au sein des micelles, le départ d'une fraction du phosphocaséinate calcique; cela stabilise la solution colloïdale en la rendant moins sensible à l'action de la présure, par exemple.

En raison de la présence concomitante de lactose et de phosphopeptides (produits d'hydrolyse de la caséine), les minéraux sont de tous les éléments du lait ceux qui sont les mieux adsorbés et retenus. A cet égard, le rapport calcium/phosphore (Ca/P) du lait de vache (voisin de 1,2), bien qu'inférieur à celui du lait maternel (voisin de 2,2), est de loin supérieur à celui des autres denrées alimentaires, faisant du lait une excellente source de calcium et un bon correctif des rations pauvres en calcium.

Chez le nourrisson et l'enfant, une attention particulière doit être portée à la concentration sodique élevée, voire très élevée du lait de vache. Comparé au lait maternel, celui-ci en contient trois à quatre fois plus, et des apports sodés excessifs semblent impliqués dans la pathogénie de l'hypertension chez l'adulte.

FIGURE 6
Distribution du calcium et du phosphore dans le lait de vache (à lire de haut en bas pour le phosphore et de bas en haut pour le calcium)

Phosphore total (1 g/l)			
Organique		Minéral (inorganique)	
Esters phosphoriques Phospholipides Complexe avec riboflavine	Phosphosérine de la caséine	Phosphate tricalcique du phosphocaséinate	Phosphates en solution
(%) 17 (g/l) 0,17	19 0,19	30 0,30	34 0,34
Soluble	Insoluble (colloïdal)	Insoluble	Soluble

Calcium lié à la caséine	Phosphate tricalcique du phosphocaséinate	Sels de calcium (non ionisés)	Calcium ionisé
(%) 21 (g/l) 0,27	46 0,60	21,5 0,28	11,5 0,15
Organique	Minéral (inorganique)		
Calcium total (1,3 g/l)			

Source: Alais, 1984.

Oligo-éléments

La présence des oligo-éléments dans le lait a pu être mise en évidence grâce à l'amélioration sensible des techniques analytiques. Leurs teneurs varient fortement mais, au-delà de certaines limites, elles sont l'indice d'une contamination du lait.

Les oligo-éléments présentent, à doses trop élevées (pollution, par exemple), un caractère toxique pour la santé et/ou nuisible en technologie laitière. D'une manière générale, le lait constitue pour l'homme une mauvaise source d'oligo-éléments. Ils s'y trouvent le plus souvent sous forme orga-

nique, à des taux relativement modestes, et lorsque les taux semblent plus proches des besoins, ils sont présents sous forme inorganique (de moindre biodisponibilité). C'est le cas notamment du cuivre et du manganèse, très liés aux groupements phosphates de la caséine. Dans une certaine mesure, le zinc (et le fer) font exception à cette règle.

Les teneurs en oligo-éléments du lait données dans la littérature (tableau 28) sont seulement indicatives, dans la mesure où elles subissent l'influence de divers facteurs (alimentation, stade de lactation, etc.) et dépendent aussi des méthodes utilisées. Par ordre d'importance (quantitative) au plan nutritionnel, il convient de citer:

- Le fer: le lait de vache est pour l'homme une mauvaise source de fer, moins en raison de sa teneur (comparable à celle du lait humain) qu'en raison de sa biodisponibilité (fer non lié à la lacto-[trans-] ferrine porteuse). Le fer du lait de vache est lié à la caséine et à la fraction de poids moléculaire bas pour 60 pour cent environ.
- Le zinc: le zinc se trouve dans le lait de vache à des taux et sous forme nettement plus favorables pour la nutrition humaine. Il est fortement lié à la caséine (80 pour cent) mais aussi aux immunoglobulines (20 pour cent).
- Le cuivre: le cuivre est très peu abondant dans le lait de vache et est lié aux protéines. Sous régime lacté strict, des enfants en état nutritionnel précaire ont présenté des carences cupriques avérées (Cordano, Baerth et Graham,1964).
- Le manganèse: le manganèse est d'ordinaire seulement présent dans le lait à des concentrations faibles.
- L'iode, le fluor et le brome: ils ne sont trouvés dans le lait que dans la mesure où l'eau et le sol en sont pourvus. L'iode est surtout lié aux protéines, mais existe aussi sous forme libre. L'iode et le brome sont plus abondants dans les régions côtières puisque ces éléments sont apportés par les embruns et les pluies marines.
- Le sélénium: le sélénium consommé par le cheptel provient d'herbes produites sur un sol sélénifère. Les carences se rencontrent chez l'animal comme chez l'homme dans les régions où le sol en est particulièrement

TABLEAU 28
Teneurs en oligo-éléments du lait de vache (µg/litre)

Oligo-éléments	Teneurs
Aluminium	600-1 000
Arsenic	<50
Bore	150-300
Brome	150
Cadmium	<1
Chrome	15-30
Cobalt	0,5
Cuivre	20-40
Etain	100-1 000
Fer	200-500
Fluor	70-200
Iode	10-300
Manganèse	10-30
Mercure	<1
Molybdène	70
Plomb	2-10
Sélénium	10-30
Silicium	1 000-6 000
Strontium	350
Zinc	3 000-6 000

Source: Renner, 1983 et 1989.

dépourvu (Nouvelle-Zélande, Chine, etc.). Le sélénium semble exister sous forme ionique à l'état libre.

• Le cobalt, constituant de la vitamine B_{12}.

Toxicité des oligo-éléments contenus dans le lait. Ces nutriments essentiels présentent tous un caractère toxique par effet direct ou indirect. A hautes teneurs, le cuivre, le fer et le manganèse sont des agents catalytiques favorisant l'oxydation des lipides. La corrosion par l'eau ou par des produits

de nettoyage de canalisations, cuves et robinets en cuivre ou en alliage de cuivre provoque la contamination du lait lors de contacts.

Les autres oligo-éléments découverts dans le lait doivent plutôt être considérés comme des contaminants dans la mesure où on ne leur connaît pas (encore) de fonction. Pour certains d'entre eux, le mode de contamination relève en grande partie du processus agricole ou industriel. Il en va ainsi pour l'aluminium (cuves, bidons), le bore et le brome (teneur dans les pâturages côtiers) ainsi que le cadmium (aliments et eau du bétail contaminés par des rejets miniers, industriels et des engrais, pollués par des pesticides). La glande mammaire en limite cependant le passage dans le lait, où il se fixe tant sur la caséine (environ 40 pour cent) que sur les protéines solubles (environ 40 pour cent).

L'étain contamine le lait lorsque sont employés, pour son stockage, des bidons ou des cuves en métal étamé (fer et cuivre). Cette contamination peut être évitée avec l'utilisation d'acier inoxydable. L'usage de boîtes en fer étamé pour le conditionnement du lait (concentré) et des produits laitiers (crèmes, desserts) expose également à l'intoxication au plomb, dans la mesure où l'étain en contient souvent.

Le plomb apparaît dans le lait de vache lorsque l'animal en consomme (dépôts de plomb-tétraéthyle sur les pâtures situées en bordure de grands axes routiers), bien que la glande mammaire en freine le passage dans le lait. L'eau stagnant dans les conduites en plomb peut contaminer le lait tout comme les récipients (revêtus de peinture au plomb). Le zinc peut, de manière analogue, contaminer fortement le lait mis au contact de matériel galvanisé. Le mercure est normalement absent du lait; sa présence est accidentelle (pollution industrielle, bris de thermomètre) et grave parce qu'il se lie aux protéines.

L'iode peut apparaître dans le lait à un taux en µg/kg qui excède de deux fois environ la quantité quotidienne ingérée en mg. L'emploi exagéré de suppléments alimentaires, de compléments minéraux et de pierres à lécher fortement iodées dans l'alimentation animale contamine le lait. Il en est de même de l'usage de substances bactéricides du type iodophores utilisées pour le trempage des trayons et la désinfection du matériel.

Le fluor s'accumule dans la mamelle (d'une lactation à l'autre) lorsque les

eaux de consommation en sont fort chargées. Le risque toxique reste limité grâce au rôle barrière de la mamelle.

De manière globale, on peut retenir l'extrême variabilité du taux des oligo-éléments dans le lait de vache. On notera également que les quantités de cobalt, d'aluminium, de molybdène et de manganèse d'origine alimentaire influencent très directement les taux lactés alors que, pour le fer, le nickel, l'arsenic et le plomb, la glande mammaire exerce un rôle de filtre régulateur.

Le lait cru d'un animal sauvage est naturellement plutôt pauvre en oligo-éléments. Plus l'animal est complémenté, plus les pâturages sont engraissés, voire pollués, plus le lait est traité, plus le risque de contamination souvent sélective augmente au point parfois d'atteindre un degré de toxicité. En cas de doute ou de risque, chaque situation particulière mérite d'être analysée en utilisant les méthodes et les techniques de dosage appropriées.

Vitamines

Toutes les vitamines connues sont présentes dans le lait de vache (tableau 29). Les diverses techniques de traitement du lait peuvent en modifier sensiblement les taux, surtout pour la vitamine C (Gregory, 1975).

Vitamines hydrosolubles. Ces vitamines se trouvent dans le colostrum à des taux transitoirement (environ 14 jours) deux fois plus élevés que dans le lait mature avant d'atteindre des taux stables.

Dans le lait de vache, la thiamine (vitamine B_1) est en partie libre et en partie liée aux protéines ou phosphorylée. Elle est ainsi vulnérable à la chaleur (chauffage prolongé à haute température), mais résiste à des chauffages forts (145-150 °C) et brefs (quelques minutes).

Le lait de vache constitue une source alimentaire importante de riboflavine (vitamine B_2) pour l'homme. Elle s'y trouve à l'état libre ou associée à des protéines et des phosphates à la surface des globules gras. Cette vitamine intervient dans les phénomènes d'oxydoréduction et peut entraîner la destruction de la vitamine C avec apparition de saveurs désagréables. Elle est très photosensible et, après quelques heures d'exposition au soleil, le lait peut avoir perdu entre 50 et 80 pour cent de son activité vitaminique B_2.

TABLEAU 29

Concentrations en vitamines du lait de vache (mg/litre)

Vitamines	Moyennes
Vitamines hydrosolubles	
B_1 (thiamine)	0,42
B_2 (riboflavine)	1,72
B_6 (pyridoxine)	0,48
B_{12} (cobalamine)	0,0045
Acide nicotinique	0,92
Acide folique	0,053
Acide pantothénique	3,6
Inositol	160
Biotine	0,036
Choline	170
C (acide ascorbique)	8
Vitamines liposolubles	
A	0,37
β-carotène	0,21
D (cholécalciférol)	0,0008
E (tocophérol)	1,1
K	0,03

Source: Renner, 1983 et 1989.

Cependant, elle résiste bien à la chaleur et la stérilisation classique du lait provoque une perte ne dépassant pas même 10 pour cent de l'activité initiale.

La vitamine PP (vitamine antipellagreuse ou niacine) ne se trouve qu'en faibles quantités dans le lait de vache et entièrement à l'état libre. Par contre, on y trouve en abondance du tryptophane, un précurseur de la niacine. Cette vitamine est stable à l'air et à la lumière et peu sensible à la chaleur.

Le lait de vache est riche en acide pantothénique. Cette vitamine s'y trouve presque totalement à l'état libre et est un facteur de croissance pour divers

micro-organismes, dont les lactobacilles. Elle est stable à l'air et à la lumière mais, par contre, très sensible à la chaleur et aux modifications du pH.

La teneur en vitamine B_6 est de cinq à dix fois plus élevée dans le lait bovin que dans le lait humain; elle s'y trouve essentiellement à l'état libre. La pasteurisation et la stérilisation UHT du lait la laissent intacte, mais la stérilisation classique en détruit 50 pour cent. Une carence prolongée peut être la cause de convulsions chez le nourrisson.

L'acide folique se trouve dans le lait de vache à des concentrations fort variables (allant de 1 à 25) et est lié aux protéines. Facteur de croissance pour divers micro-organismes, il est sensible à la lumière et à l'oxygène, mais stable à la chaleur et à des pH supérieurs à 4.

La biotine se trouve totalement à l'état libre, mais en faibles quantités dans le lait. Elle est stable à la chaleur et à la lumière, mais sensible à l'air.

Le lait contient peu de vitamine B_{12} (cyanocobalamine), mais son activité est considérable. Elle est liée au lactosérum (95 pour cent) et est stable à l'air, mais sensible à la lumière et au chauffage, surtout lorsqu'il n'est pas effectué à l'abri de l'air. La pasteurisation HTST n'en détruit que 10 pour cent, mais la stérilisation classique 90 pour cent.

En comparaison des fruits ou légumes qui en fournissent jusqu'à 100 fois plus, le lait ne représente pas une bonne source de vitamine C. Celle-ci existe sous forme libre uniquement; elle est très fragile et sensible à l'air, à la lumière et au chauffage (perte de 50 pour cent au cours de la stérilisation classique, de 10 pour cent seulement au cours de la pasteurisation). Le stockage et l'agitation du lait en tanks réfrigérés (2 à 4 °C) pendant 36 heures détruit plus de la moitié et jusqu'aux trois quarts de l'acide ascorbique.

Vitamines liposolubles. Les taux de vitamines A, D, E et K du lait dépendent de nombreux facteurs. Comme ces vitamines sont dissoutes dans la matière grasse, elles passent lors de l'écrémage dans la crème et le beurre. Le lait contient beaucoup de vitamine A (et de précurseurs caroténoïdes: 30 pour cent de l'activité vitaminique A totale) lorsque la nourriture des animaux est riche en herbes fraîches (fourrage vert) et en carotène. De ce fait, il contient, en été, de une fois et demie à deux fois plus de carotène et de rétinol qu'en hiver. Le carotène est le colorant de la matière grasse du lait. Certaines races

convertissent moins le carotène et l'absorbent intact avant de l'éliminer en partie dans le lait, lui donnant une couleur caractéristique.

Le lait de vache ne contient de la vitamine D (vitamine D_3 ou cholécalciférol, essentiellement en tant que sulfate) qu'en faibles quantités (de 1 à 50 ng/litre). La vitamine D existerait aussi sous forme hydrosoluble à des concentrations parfois importantes (de 3 à 4 µg/litre), mais seulement en relation étroite avec les protéines solubles, et ceci avant de gagner la membrane des globules gras. La teneur lactée varie en fonction du temps d'exposition de l'animal à la lumière solaire et aussi de l'alimentation consommée, en d'autres termes selon les régions et les saisons.

Le lait est parfois artificiellement enrichi en vitamine D et les procédés de stérilisation par ultraviolet empêchent un contrôle précis de l'enrichissement. En cas de surdosage, le lait prend une saveur oxydée.

La vitamine E (de 2 à 5 mg par 100 g de matières grasses) est un antioxydant qui protège les lipides des altérations oxydatives. Plus de 95 pour cent de la vitamine E est de l'α-tocophérol, le composé biologique le plus actif, le reste étant composé de gamma-tocophérol uniquement.

La vitamine K (synthétisée dans le rumen) se trouve toujours dans le lait en quantités faibles, mais suffisantes pour l'homme (de 0,1 à 0,5 mg par 100 g de lipides).

Enzymes

Une soixantaine d'enzymes ont été répertoriées dans le lait, mais leur rôle n'est pas toujours clairement établi. Certaines de ces enzymes n'existent d'ailleurs pas (ou à peine) dans le lait humain, comme la lactoperoxydase, la xanthine oxydase ou la ribonucléase.

Certaines sont des facteurs de dégradation (utiles ou nuisibles), comme les protéases qui facilitent l'hydrolyse de la caséine et les lipases, facteurs de rancissement. D'autres possèdent une activité bactéricide ou bactériostatique. La lactoperoxydase, l'enzyme la plus abondante du lait de vache, agit contre les bactéries en présence de H_2O_2 et de thiocyanate (SCN-) lorsque ces substances sont présentes en concentrations suffisantes. Ce système protège aussi les muqueuses de l'animal contre les radicaux libres. Les taux

de thiocyanate du lait de vache semblent sans danger pour la fonction thyroïdienne.

La xanthine oxydase contribue, comme la lactoperoxydase, au rancissement du lait. Enfin, la quantité de certaines enzymes du lait (catalase) constitue un indicateur de son niveau d'hygiène. Ce taux, qui dépend du nombre de bactéries (contamination), est élevé dans le colostrum et augmente en cas de mammite.

Hormones

Le lait de vache contient des hormones dont l'activité biologique est connue, mais dont le rôle est beaucoup moins certain. Il semble que la plupart de ces hormones soient détruites dans le tube digestif, du moins chez l'homme.

Les taux des oestrogènes (de 60 à 200 ng/litre) et de la prolactine (environ 50 µg/litre) diminuent au fur et à mesure que la lactation progresse. La progestérone (environ 13 µg/litre) existe en proportion directe avec le taux de lipides; elle est pratiquement absente du lait écrémé (< 2 µg/litre) et lorsqu'on l'y trouve en quantité supérieure à 6 µg/litre, une nouvelle gestation doit être suspectée. On trouve également des corticostéroïdes dans le lait (de 8 à 18 µg/litre) et diverses prostaglandines, ainsi que de la somatotropine, des gonadotropines, de la thyrotropine et des polyamines (Sanguansermsri, Gyorgi et Zilliken, 1974). L'activité biologique sur l'homme des hormones naturelles du lait de vache est considérée comme nulle. Certaines hormones de synthèse, administrées à l'animal pour augmenter la production lactée, se retrouvent dans les laits. Cette pratique est donc à proscrire et souvent interdite.

Acides organiques

De nombreux acides organiques ont été détectés dans le lait. Les principaux sont cités ci-après.

Acide citrique. Sa concentration est en moyenne de 1,7 g/litre. Cet acide représente à lui seul plus de 90 pour cent des acides organiques du lait. Il se trouve en solution, moins de 10 pour cent étant associé à la caséine et au calcium dans la phase colloïdale. Son rôle est de réduire l'excrétion urinaire

du calcium ionisé du plasma sanguin et d'éviter ainsi une déminéralisation de l'os. L'acide citrique est dans les produits laitiers fermentés le point de départ de substances aromatisantes.

Acide neuraminique. Cet acide se trouve dans le lait à un taux moyen de 150 mg/litre et sous forme acétylée (acide N-acétyl-neuraminique ou acide sialique). Il est pour 80 pour cent environ lié à la caséine (kappa), dont il assure une part de la stabilité.

Acides nucléiques. Les acides ribonucléiques (50 mg/litre), désoxyribonucléiques (12 mg/litre) et les nucléotides (dont 80 pour cent d'acide orotique: 100 mg/litre) sont présents dans le lactosérum; ils sont également associés, en faibles quantités, à la caséine. Un avantage de ces quantités modestes est que la formation d'acide urique au cours du catabolisme alimentaire est très faible, à l'opposé de ce qui se produit après consommation de viande.

L'acide orotique s'est vu attribuer des rôles multiples, dont un effet favorable sur la croissance du *Lactobifidus bulgaricus*.

Substances indésirables

La mamelle est un émonctoire et le lait peut contenir des substances ingérées ou inhalées par l'animal, sous la forme soit du constituant original, soit de composés dérivés métabolisés. Les substances étrangères peuvent provenir des aliments (engrais et produits phytosanitaires), de l'environnement (pesticides), de traitements prescrits à l'animal (produits pharmaceutiques, antibiotiques, hormones) (Mahieu *et al.*, 1977).

Ces contaminations posent des problèmes particuliers, parce qu'il est souvent difficile d'en apprécier les conséquences à long terme sur la santé (Mueller et Schroeder, 1978). Les mesures de prévention restent la pratique la plus logique et la plus efficace, que l'anxiété des médecins ou du public soit justifiée ou non.

Pesticides. Ces produits sont destinés à détruire les insectes qui attaquent le bétail, les cultures et les récoltes. Tous présentent un degré de toxicité pour

l'homme; certains seulement se retrouvent dans le lait quand la vache les a consommés.

Les phosphates (très toxiques) sont ainsi très rapidement métabolisés, les organophosphorés sont très peu rémanents et les organochlorés (stables et lipophiles) sont éliminés à concurrence de 30 à 40 pour cent dans le lait. Même le chauffage du lait ne les détruit pas (DDT et son métabolite essentiel, le DDE) (Renterghem, 1976; Renterghem, Moermans et Brack, 1979).

Antibiotiques. Leur usage chez l'animal en fait des constituants sporadiques du lait, et donc une source de sélection de souches résistantes et d'accidents allergiques pour le consommateur.

Eléments radioactifs. Suite à l'incendie d'une usine nucléaire en avril 1986 à Tchernobyl (Ukraine), l'environnement a été contaminé. Des nuages de radioactivité ont sillonné l'Europe dans les 2 à 3 jours suivant l'accident (Bruce et Slorach, 1987). En apparence, l'Autriche a été parmi les pays les plus touchés par les retombées. Le taux d'iode 131 a été élevé pendant 2 à 3 semaines dans le lait de vache. Cette radioactivité s'est estompée au rythme de la demi-vie brève de cet élément.

Les taux de césium radioactif ont augmenté plus lentement pour culminer 2 mois environ après la contamination. Quatre mois plus tard, ces taux étaient encore nettement plus élevés que ceux mesurés en routine, préalablement à la destruction de l'usine nucléaire. Au cours de l'hiver, la consommation de fourrage (foin ramassé en juin) s'est accompagnée d'une remontée passagère mais notable de la radioactivité du lait.

Une réglementation stricte (tableau 30) et une surveillance des laits de consommation ont suffi à maîtriser le problème. Le lait contaminé (voir normes européennes) a été déclaré impropre à la consommation et retiré des circuits de distribution. En outre, un contrôle a été excercé sur les laits importés, notamment sur ceux utilisés pour la fabrication des laits en poudre destinés aux nourrissons.

Nitrates et nitrosamines. La fabrication de certains produits laitiers s'ac-

TABLEAU 30

Niveau de contamination radioactive pour un ensemble de radionucléides: seuils à ne pas dépasser pour le lait et les aliments pour nourrissons

Radionucléides	Seuils
Am 241, Pu 239	1 Bq/kg
I 131, Ae 90	100 Bq/kg
Cs 134, Cs 137	1 000 Bq/kg

Note: En cas d'accident nucléaire, le règlement Euratom exige de ne plus dépasser 400 Bq/kg pour le césium (134 et 137).
Source: Valeurs proposées par la FAO/OMS et adoptées par la commission du Codex Alimentarius (juillet 1989) et/ou par le règlement Euratom.

compagne d'une addition de nitrate de potassium ou de sodium dans le lait à cailler. Ceux-ci s'accumulent surtout dans le lactosérum. De fait, on peut trouver dans les produits secs, des nitrates en concentrations très élevées.

Les nitrates peuvent former des liaisons avec divers composants du lait. Les nitrites qui découlent de la conversion des nitrates peuvent former des nitrosamines, dont certaines sont cancérigènes.

Métaux. A leur propos, il convient de distinguer entre la découverte d'un antagoniste naturellement présent dans le lait et une contamination par cette même substance en quantités inutiles, voire dangereuses. Par exemple, on accepte dans les crustacés un taux d'arsenic de 50 ppm, mais on s'inquiète d'en trouver plus de 0,05 ppm dans du lait.

Parmi les métaux susceptibles de contaminer le lait à des taux inquiétants pour la santé, on peut citer le sélénium, l'arsenic, le plomb, le mercure et le cadmium.

Polychlorodiphényles. Certains produits chimiques, comme les phtalates, les esters de l'acide sébacique et certains polychlorobiphényles (PCB), présentent un degré certain de toxicité pour l'homme, d'autant plus que ces substances sont stables dans l'organisme où elles s'accumulent dans le tissu adipeux (Murata, Zabik et Zabik, 1977; Luquet *et al.*, 1979).

Variations dans la composition

La quantité de lait produit par un animal et sa composition subissent des fluctuations d'origine physiologique (nombre de vêlages, époque de lactation, état de santé, activité de l'animal) et des variations d'origine génétique (espèce, race), zootechnique (mode, moment de la traite), alimentaire (foin, fourrage) et, enfin, climatique.

Les modifications de composition non directement ou indirectement imputables à l'animal, comme les conditions de conservation ou les contaminations postérieures à la traite, sont la conséquence d'altérations du lait.

Sa nature biologique, la complexité de sa structure physique et la grande diversité de ses constituants chimiques en font un produit fragile, très facilement altérable. Les dégradations peuvent être dues à des facteurs intrinsèques du lait (leucocytes, enzymes, micro-organismes) ou à des agents extrinsèques (oxygène de l'air, lumière, poussières, contaminants chimiques et, surtout, micro-organismes). Les modifications contrôlées ou non de composition physico-chimique qui en découlent se répercutent directement en technologie laitière (voir chapitres suivants).

Fluctuations physiologiques intra-individuelles. Peu avant le vêlage et pendant les 6 à 9 jours suivants, la mamelle produit le colostrum (liquide jaunâtre, visqueux et amer), riche en protéines et en minéraux, mais pauvre en lactose. Il apporte aux jeunes veaux des anticorps indispensables et des éléments purgatifs. Après cette période colostrale, la quantité de lait augmente progressivement (pendant environ 1 mois), se stabilise pendant 2 à 3 mois pour diminuer ensuite jusqu'au tarissement 6 mois plus tard.

La concentration en matière sèche diminue pendant le mois qui suit le vêlage, puis augmente régulièrement en raison de l'accroissement des matières azotée et grasse. L'écart entre la teneur minimale (1 mois) et la teneur maximale (10 mois) en lipides ou en protéines peut atteindre facilement de 5 à 10 g/litre, voire davantage. La courbe de concentration en lactose varie au cours de la lactation; celle-ci après une augmentation rapide au cours du premier mois, reste ensuite constante.

Vers la fin de la lactation, lorsque la teneur azotée s'élève rapidement, un déséquilibre s'installe entre les composants du lait (avec augmentation

concomitante en chlorure de sodium) et le rend, comme le colostrum, impropre aux fabrications. On observe également une évolution individuelle normale du début à la fin de la traite (augmentation régulière de la teneur en matière grasse et baisse de la teneur en protéines). Si le lait n'est pas évacué, les molécules de synthèse (lactose, caséine et graisse) subissent une résorption et le lait obtenu (dit de «rétention») est de composition anormale.

Variabilité interindividuelle. L'influence propre de chacun des paramètres de variabilité est difficile à identifier. Ce sont les facteurs raciaux, liés aux effets de la sélection, et les facteurs alimentaires qui ont les conséquences les plus importantes sur le lait au plan nutritionnel, technologique et économique. Ainsi, les laits des vaches frisonnes sont moins riches en matières grasses et en protéines que ceux des vaches anglo-normandes. Les Jersiaises fournissent un lait riche qui rappelle celui des vaches zébus de l'Inde.

De même, la vache au pâturage produit plus d'acides longs (stéarique et oléique) et moins de chaînes moyennes (laurique, myristique et palmitique), tandis que la vache en étable produit plus d'acides gras polyinsaturés, surtout parce que son alimentation en contient.

Variabilité spatio-temporelle. En raison de l'importance de certaines variations saisonnières notamment, tous les laits n'ont pas la même aptitude à être transformés en fromage ou en beurre.

Dans les pays tempérés, la collecte quantitative du lait peut présenter entre l'hiver et l'été des écarts de 1 à 1,5, alors que, dans d'autres pays, ces écarts peuvent varier de 1 à 8 ou 10. Dans les pays tropicaux, il est courant de voir une production abondante en saison humide totalement arrêtée en saison sèche.

Les courbes de production et de composition du lait peuvent varier dans leurs niveaux (minima, maxima) et leurs pentes. Les fluctuations sont plus importantes pour des laits individuels et s'estompent à mesure que le lait est de plus grand mélange.

D'une façon générale, il est toujours économiquement préférable de réduire le plus possible les variations de composition qualitatives et quan-

titatives, ce qui justifie un ensemble de pratiques (régularisation des vêlages et de l'alimentation, sélection des races, mélange des laits et incitations économiques).

LAITS D'AUTRES ANIMAUX D'ÉLEVAGE

Introduction

L'information statistique (effectifs) et scientifique concernant certaines espèces d'animaux laitiers tels que le lama, le yak et le renne étant rare ou peu sûre, cette section se limite à l'étude des laits de bufflonne, de brebis, de chèvre, de chamelle et de jument. Ce choix est guidé par l'importance économique et l'intérêt nutritionnel que présente la production de ces laits.

L'élevage du buffle, le deuxième élevage laitier mondial, ne concerne qu'un nombre limité de pays; 88 pour cent de la production de lait de bufflonne est réalisée dans deux pays, l'Inde et le Pakistan (tableau 31). En Inde, la moitié du lait consommé provient de cet animal, et une recherche active porte sur la zootechnie et la génétique de différentes races laitières (FAO, 1977). Ce lait est aussi utilisé, en Inde notamment, pour la fabrication de formules lactées infantiles (Ganguli et Kuchroo, 1979; Dubey et Gupta, 1988).

Les productions de lait de brebis et de chèvre viennent très loin derrière celles du lait de bufflonne. Chacune d'elles n'atteint pas 2 pour cent de la production laitière mondiale. L'élevage de la brebis et celui de la chèvre sont plus disséminés que celui de la bufflonne; on peut toutefois constater une certaine concentration de la production du lait de chèvre dans le sous-continent indien (tableau 31). Le lait de chèvre est bu en particulier dans les régions où il n'est pas concurrencé par le lait de vache, que les populations jugent supérieur. Il est aussi la matière première de yaourts et de fromages, produits dont la fabrication est facilitée par les caractéristiques du lait de chèvre. Les teneurs en protéines et lipides du lait de chèvre sont plus élevées que celles du lait de vache. Le lait de chèvre diffère donc encore plus sensiblement du lait humain que le lait de vache (Muggli, 1982).

La production de lait de brebis est concentrée dans les pays où la production de lait de vache est limitée, mais elle concerne également des pays de grande tradition fromagère comme la France (tableau 31). Par ses

TABLEAU 31

Principaux pays producteurs de lait de bufflonne, de brebis et de chèvre

Pays	Production latière (milliers de tonnes)
Bufflone	
Inde	23 600
Pakistan	10 538
Chine	1 938
Egypte	1 300
Népal	603
Italie	110
Monde	38 580
Brebis	
France	1 080
Turquie	893
Iran	735
Grèce	650
Italie	628
Chine	575
Monde	8 470
Chèvre	
Inde	1 500
Somalie	675
Pakistan	620
Turquie	524
France	460
Grèce	460
Monde	8 780

Note: La production mondiale de lait de vache est de 475 507 milliers de tonnes.
Source: FAO, 1990.

TABLEAU 32
Principaux pays éleveurs de chameaux

Pays	Effectifs *(milliers de têtes)*
Somalie	6 855
Soudan	2 800
Inde	1 450
Ethiopie	1 080
Pakistan	990
Mauritanie	820
Monde	19 450

Source: FAO, 1990.

caractéristiques biochimiques, le lait de brebis présente de grandes similitudes avec le lait de chèvre; il est donc très différent du lait humain.

L'élevage du chameau est limité à l'Afrique et à l'Asie (d'autres espèces de camélidés existent en Amérique du Sud). Le chameau est par excellence un animal adapté aux conditions de sécheresse (tableau 32) et la composition du lait de chamelle reflète les conditions de vie de l'animal. Le lait est consommé frais (le colostrum n'est pas consommé); c'est un liquide blanc, opaque et au goût fort. Il a une place importante dans l'alimentation des populations nomades.

L'intérêt porté au lait de jument tient à la fois à son utilisation comme matière première pour la fabrication de boissons gazeuses, le kéfir et le koumiss (Koroleva, 1988), qui sont des aliments traditionnels en Asie centrale et dans le Caucase, et à son utilisation comme aliment de remplacement en pédiatrie, en raison des ressemblances de composition existant entre le lait de jument et le lait humain. Les analyses portent essentiellement sur le lait des animaux de trait (Langlois, 1986), même si les races de sports commencent à faire l'objet d'études.

Composition

Caractéristiques physico-chimiques. Les caractéristiques physico-chimi-

ques des différents laits sont regroupées au tableau 33. Certains laits ont été étudiés de manière aussi détaillée que le lait de vache, c'est le cas des laits de bufflonne, de brebis et de chèvre. Par contre, l'information est plus limitée en ce qui concerne celui de chamelle et plus encore celui de jument. Ce tableau fait apparaître qu'une ressemblance existe entre les laits de vache et de bufflonne. La densité du lait de brebis ainsi que celle des races de chèvre à lait gras est plus élevée que celle du lait de vache. De même, la viscosité du lait de brebis est élevée. Le lait de chèvre se caractérise par un pourcentage élevé de micelles de caséine soluble (de 10 à 20 pour cent contre 1 pour cent pour le lait de vache).

Energie. L'apport en énergie d'un litre de lait différencie les espèces animales considérées et est susceptible de larges variations à l'intérieur d'une même espèce (cela étant, bien entendu, lié à la teneur en lipides du lait). L'apport énergétique est en moyenne de 1 000 kcal/litre pour le lait de bufflonne, de 1 100 pour celui de brebis et plus faible pour ceux de chamelle (800), de chèvre (de 600 à 650) et de jument (inférieur à 600).

Protéines. Les teneurs en protéines totales sont voisines dans les laits de vache, de chamelle et de chèvre. Elles sont, en moyenne, plus basses dans le lait de jument, plus élevées dans le lait de bufflonne et encore plus dans celui de brebis (de une fois et demie à deux fois plus élevées que dans le lait de vache) (tableau 34). Les laits des différentes espèces se classent de la même manière en ce qui concerne les caséines.

Lait de bufflonne. Comparé au lait de vache, le lait de bufflonne contient relativement plus de caséines bêta et gamma et moins de caséines α et kappa si l'on se réfère à des données moyennes (tableau 34), mais les variations individuelles sont grandes à l'intérieur de l'espèce. La composition en acides aminés des différentes caséines du lait de bufflonne diffère quelque peu de celle de leurs homologues du lait de vache.

Dans les protéines du lactosérum, les proportions d'α-lactalbumine et de bêta-lactoglobuline sont très proches dans le lait de bufflonne, alors qu'elles sont presque dans un rapport de 2 à 1 dans le lait de vache (tableau 34). Le

TABLEAU 33

Caractéristiques physico-chimiques des laits de diverses espèces animales

Constantes	Vache	Bufflonne	Chamelle	Chèvre	Brebis
Energie *(kcal/litre)*	705	755-1 425	800	600-750	1 100
Densité du lait entier à 20 °C	1,028-1,033	1,029-1,033	1,025-1,038	1,027-1,035	1,034-1,039
Point de congélation *(°C)*	-0,520--0,550	-0,544	-0,580	-0,550--0,583	-0,570
pH-20°C	6,60-6,80	6,66-6,82	6,20-6,82	6,45-6,60	6,50-6,85
Acidité titrable *(°Dornic)*	15-17	14-18	–	14-18	22-25
Tension superficielle du lait entier à 15 °C *(dynes/cm)*	50	48,7	–	52	45-49
Conductivité électrique à 25 °C *(siemens)*	45×10^{-4}	$66,2 \times 10^{-4}$	–	$43\text{-}56 \times 10^{-4}$	38×10^{-4}
Indice de réfraction	1,45-1,46	–	–	1,35-1,46	1,33-1,40
Viscosité du lait entier à 20 °C *(centipoises)*	2,0-2,2	–	–	1,8-1,9	2,86-3,93

Note: Le signe – signifie que les données font défaut ou sont sujettes à caution

Source: Compilation de diverses sources.

TABLEAU 34

Composition moyenne en g/litre et distribution des protéines dans le lait de diverses espèces animales

Protéines	Vache	Bufflonne	Jument	Chèvre	Brebis
a-lactabumine	1,5 (45%)	2,50 (37%)	2,30 (26%)	2,0 (25%)	1,3 (10%)
ß-lactoglobuline	2,7 (25%)	2,70 (39%)	5,30 (59%)	4,4 (55%)	8,4 (67%)
Albumine sérique	0,3 (5%)	0,20 (3%)	0,20 (2%)	0,6 (7%)	0,6 (5%)
Immunoglobulines	0,7 (12%)	1,35 (20%)	1,10 (13%)	0,5 (6%)	2,3 (18%)
Protéose-peptone	0,8 (13%)	– (–)		0,6 (7%)	
Total des protéines solubles (100%)	6,0 (100%)	6,75 (100%)	9,00 (100%)	8,10 (100%)	12,6 (100%)
Caséine α-S	12,0 (46%)	9,30 (26%)			21,0 (47%)
Caséine β	9,0 (36%)	18,20 (51%)			16,1 (36%)
Caséine κ	3,5 (13%)	– (–)			4,5 (10%)
Caséine γ	1,5 (6%)	8,25 (23%)			3,0 (6%)
Total des caséines (100%)	26,0 (100%)	35,75 (100%)	13,60 (100%)	26,0 (100%)	44,6 (100%)
Protides totaux	32,0	42,50	22,60	34,1	57,2

Source: Compilation de diverses sources.

lait de bufflonne contient les mêmes constituants de l'azote non protéique que le lait de vache.

Lait de jument. Dans le lait de jument, plus de 90 pour cent des matières azotées sont sous forme de protéines et la composition en acides animés des protéines totales de ce lait s'écarte en partie de celles des laits des autres espèces. Dans l'espèce équine, seulement 47 à 68 pour cent de l'azote du lait est sous forme de caséines, alors que ce pourcentage est de l'ordre de 80 pour cent chez la vache, la bufflonne, la chèvre et la brebis. Le lait de jument ne contient que 13 g de caséines par litre contre 25 g pour le lait de vache. Par contre, les teneurs en protéines des laits humain et équin sont très proches.

Lait de chèvre. Le profil en acides aminés totaux du lait de chèvre est proche de celui du lait humain et les acides aminés essentiels s'y trouvent en excès relatif par rapport aux besoins du nourrisson.

Par comparaison avec le lait de vache, les protéines du lait de chèvre contiennent proportionnellement moins de caséines (tableau 34) et davantage d'azote non protéique. La teneur proportionnellement moindre en caséines s'explique en partie par une absence quasi complète de l'α 1S caséine (une protéine très présente dans le lait de vache) de sorte que les sujets allergiques uniquement à cette protéine supportent souvent le lait de chèvre.

Comme chez la vache, la bêta-lactoglobuline constitue la protéine majeure du lactosérum du lait de chèvre (tableau 34). Les compositions aminées de la bêta-lactoglobuline et de l'α-lactalbumine du lait de chèvre sont très proches de celles du lait de vache. Des allergies croisées entre laits de ces deux espèces ne sont donc pas rares. Cela réduit l'intérêt du lait de chèvre pour les sujets allergiques.

Enfin, dans le lait de chèvre, la fraction d'azote non protéique (en particulier l'urée) représente, comme dans le lait de femme, une proportion bien plus élevée que chez la vache.

Lait de brebis. Il est plus riche en protéines que les autres laits. En particulier, il contient beaucoup d'α-caséine. La caséine forme des micelles chargées de phosphore et de calcium de caractéristiques physico-chimiques semblables à celles du lait de vache, mais de dimensions légèrement réduites. On trouve davantage de phosphore et de calcium dans la phase

colloïdale, mais autant dans la phase soluble que dans le lait de vache. Ces différences impriment à ces laits des caractéristiques différentes de coagulation: le lait de brebis coagule plus vite et donne un coagulum plus ferme que le lait de vache. C'est pourquoi il est très utilisé en fromagerie (comme le lait de chèvre).

La richesse du lait de brebis en protéines sériques est surtout marquée par une teneur élevée de la bêta-lactoglobuline et des immunoglobulines (tableau 34).

L'azote non protéique (de 6 à 8 pour cent de l'azote total) est distribué un peu différemment de celui du lait de vache: plus d'urée et d'acide urique et moins d'acides aminés libres.

Lipides. Les laits de bufflonnne et de brebis sont nettement plus riches en lipides que le lait de vache. Le lait de jument, par contre, contient peu de lipides (la moitié de ce que contient le lait de vache) (tableau 16).

Globules gras. La taille des globules gras est une donnée qui intéresse physiologistes et spécialistes de l'industrie laitière. Les globules gras de dimension réduite sont plus facilement digérés. Dans l'espèce équine, plus de 50 pour cent des globules gras ont une dimension inférieure à 2,5 microns (comme le lait humain). De même, dans les laits de chèvre, de brebis et de chamelle, les globules gras sont de dimension plus réduite que dans le lait de vache, tandis que ceux du lait de bufflonne sont de plus grande dimension. En technologie, il est plus facile d'homogénéiser un lait quand les globules gras qu'il contient sont plus petits.

Distribution des constituants lipidiques. A l'instar de toute matière grasse, celle du lait est distribuée en lipides simples et lipides complexes. Les lipides simples sont essentiellement des triglycérides (il y a aussi des diglycérides et des monoglycérides) et des acides gras libres; les lipides complexes sont constitués notamment de phospholipides, cérébrosides et de stérols. La distribution de ces divers constituants lipidiques est très similaire dans les laits de vache et de chèvre, avec prédominance très nette des triglycérides (environ 98 pour cent); par contre, dans le lait de jument, la distribution des

constituants lipidiques est différente. Les triglycérides ne représentent que 79 pour cent des lipides tandis que les phospholipides et les acides gras libres sont présents en plus grande quantité que dans le lait de vache.

La composition en acides gras présente des traits communs aux différentes espèces et d'autres spécifiques à chacune d'entre elles. L'acide palmitique et l'acide oléique constituent les acides en plus forts pourcentages, même si ceux-ci diffèrent d'une espèce à l'autre. En ce qui concerne les particularités, il y a lieu de noter dans le lait de chèvre la présence, plus importante que dans le lait de vache, des acides gras à chaîne courte, en particulier de l'acide caprique. C'est pour cette raison que le dosage de l'acide caprique permet de déceler le coupage frauduleux du lait de chèvre. La richesse en acide linoléique caractérise le lait de chamelle. Le lait de jument présente des ressemblances avec le lait de femme (plus riche en acide gras insaturés et en acides linoléique et linolénique) qui le différencient des laits des ruminants dont l'alimentation est aussi à base d'herbe. Cela s'explique par une absorption grêle, chez la jument, de lipides alimentaires non modifiés, alors qu'ils subissent une hydrogénation microbienne préalable à l'absorption chez les ruminants.

Gludides. Le lactose constitue, de loin, la principale source glucidique. Si l'on excepte celui de jument, les laits des espèces considérées ici ont presque la même teneur en lactose (tableau 16). Dans une espèce donnée, le lait peut sembler plus doux ou plus amer selon la teneur en lactose.

Minéraux et oligo-élements. Le tableau 35 regroupe les données concernant ces éléments. Dans un ensemble de données relativement homogènes, on peut remarquer le faible apport minéral du lait de jument en général, malgré sa richesse en calcium, la teneur élevée du chlore dans le lait de chèvre (elle est à l'origine d'acidoses hyperchlorémiques observées chez les nourrissons exclusivement alimentés au lait de chèvre), ainsi que la teneur élevée en calcium du lait de brebis.

Vitamines. Les données concernant les vitamines sont moins complètes que celles concernant les autres nutriments (tableau 36). Il convient de remar-

TABLEAU 35

Teneurs en minéraux et en oligo-éléments des laits de diverses espèces animales (mg/litre)

	Vache	Bufflonne	Chamelle	Jument	Chèvre	Brebis
Minéraux						
Sodium	0,50	0,47	0,39	0,19	0,37	0,42
Potassium	1,50	1,39	1,76	0,68	1,55	1,50
Calcium	1,25	2,03	1,16	1,10	1,35	2,0
Magnésium	0,12	0,20	–	0,085	0,14	0,18
Phosphore	0,95	1,29	0,88	0,55	0,92	1,18
Chlore	1,00	0,65	1,99	0,30	2,20	1,08
Acide citrique	1,80	0,49	–	–	1,10	–
Oligo-éléments						
Fer	0,20-0,50	0,80-1,10		0,59	0,55	0,2-1,5
Cuivre	0,10-0,40	0,18-0,25		0,28	0,40	0,3-1,76
Zinc	3-6	2,4-6,2		2,00	3,20	1-10
Manganèse	0,010-0,030	0,050-0,170		0,05	0,06	0,08-0,36
Molybdène	0,070	0,022		–	–	–
Aluminium	0,6-1	0,22		–	–	–
Iode	–	–		0,02	–	–

Notes: Les valeurs exprimées sont des valeurs moyennes ou, dans quelques cas, des valeurs extrêmes.
Le signe – indique que les données font défaut ou sont sujettes à caution.
Source: Compilation de diverses sources.

TABLEAU 36

Teneurs en vitamines des laits de diverses espèces animales (mg/litre)

Vitamines	Vache	Bufflonne	Chamelle	Jument	Chèvre	Brebis
B_1	0,42	0,40-0,80	–	0,28	0,41	0,85
B_2	1,72	1,07-1,65	–	0,38	1,38	3,30
B_6	0,48	0,23-0,70	–	–	0,60	0,75
B_{12}	0,0045	0,0004-0,0006	0,0023-0,0039	–	0,0008	0,006
Acide nicotinique	0,92	0,80-1,72	–	0,70	3,28	4,28
Acide folique	0,053	–	–	–	0,006	0,006
C	18	19-25	57-98	145,0	4,20	47,0
A	0,37	0,48-0,69	0,37-1,26	–	0,24	0,83
β-carotènes	0,21	0,00-0,30	0,16-0,46	–	<0,10	0,02

Notes: Les valeurs exprimées sont des valeurs moyennes ou, dans quelques cas, des valeurs extrêmes.
Le signe – indique que les données font défaut ou sont sujettes à caution.
Source: Compilation de diverses sources.

quer la richesse du lait de brebis, dans presque toutes les vitamines, par rapport au lait de vache, la teneur élevée des laits de chamelle et de jument en vitamine C, ainsi que la faible teneur en folates du lait de chèvre (elle serait à l'origine des anémies mégaloblastiques que favorise également une teneur un peu basse et une faible disponibilité de la cobalamine observées chez des nourrissons ou des jeunes enfants principalement alimentés au lait de chèvre).

Comme pour le lait de vache, les teneurs en nutriments des différents laits sont susceptibles de variations, liées par exemple à la durée de la lactation ou à l'alimentation (type de fourrage utilisé). Les variations sont beaucoup plus marquées chez les camélidés. Ainsi, la teneur en eau du lait de chamelle varie selon le degré de sécheresse de l'environnement extérieur (91 pour cent d'eau en saison sèche contre 86 pour cent en saison d'abondance alimentaire); cela permet au chamelon de recevoir l'eau qui lui manque. A l'inverse, la teneur en lipides passe de 43 g/litre en période sèche à 11 g/litre en période humide.

Chapitre 3

Produits laitiers: consommation, technologie et microbiologie

INTRODUCTION

Le traitement et la transformation du lait ont pour but sa conservation (ou celle de certains de ses constituants). Celle-ci ne s'accompagne pas nécessairement de l'élimination des micro-organismes pathogènes éventuellement présents. Pour cette raison les procédés de conservation sont souvent complétés par des procédés d'assainissement.

Une laiterie, c'est-à-dire le lieu où se fait la fabrication, se caractérise tout d'abord par les quantités de produits élaborés, de l'atelier fermier ou artisanal mettant en œuvre des procédés rudimentaires manuels ou non à l'usine, traitant jusqu'à plusieurs millions de litres par jour, mettant en œuvre des procédés complexes, mécanisés, voire automatisés et informatisés. Chacun de ces établissements peut fabriquer plusieurs produits ou, au contraire, être spécialisé et n'en faire qu'un seul.

Le procédé utilisé a le plus souvent des conséquences sur la qualité des produits et les aspects socio-économiques liés à chaque entreprise, dont doivent tenir compte ceux (investisseurs, fabricants, nutritionnistes, etc.) qui, à des titres divers, recommandent ou décident en matière de lait et de produits laitiers.

L'influence des procédés sur les produits joue sur leur qualité organoleptique, leur valeur nutritionnelle et hygiénique, leur conservation, leur coût de fabrication. Sur le plan socio-économique, les incidences du procédé concernent notamment la valorisation de la matière première, son rendement, le prix de vente et, par suite, la possibilité d'achat des consommateurs, le salaire et la pénibilité du travail des hommes.

Dans le cas des procédés les plus simples qui sont généralement ceux

utilisés par l'éleveur, le fermier ou le petit artisan, on fabrique essentiellement des produits dits de type traditionnel. Issus de technologies empiriques, faits dans des conditions souvent précaires avec des équipements peu élaborés et un personnel peu formé, il en existe une grande diversité; chaque variété est elle-même de qualité très irrégulière. Cependant, dans les régions où la production laitière est faible, ces méthodes sont d'une utilité certaine et contribuent, notamment, à améliorer la nutrition des populations et le revenu des éleveurs.

Les procédés complexes, utilisés dans les grosses usines, conduisent à des produits dits industriels. Ils se caractérisent notamment par l'uniformisation et la régularisation de leur composition et de leur qualité. Cette standardisation, étroitement liée à la mise en œuvre de méthodes industrielles, résulte d'un ensemble de facteurs issus de l'évolution technico-économique, parmi lesquels on peut citer: la nécessité d'assainir le lait et les produits laitiers et d'améliorer leur durée de conservation afin d'approvisionner les centres urbains de plus en plus peuplés et de plus en plus éloignés des zones de production; la nécessité de faire des produits de composition et de qualités connues, régulières et conformes à la demande des consommateurs, des nutritionnistes et des hygiénistes (ainsi est apparue une idéologie alimentaire, considérablement renforcée par la publicité); la modification des habitudes de vie (restauration collective, déstructuration des repas, travail des femmes) et, par suite, celle des habitudes de consommation; la nécessité d'abaisser les prix de revient et d'améliorer la productivité en raison de la réduction des dépenses alimentaires des ménages et des augmentations salariales; le développement des grandes surfaces de distribution; la nécessité de réduire le travail physique par la mécanisation; la croissance de la production laitière.

Cette standardisation ainsi que la facilité des échanges mondiaux et le développement d'entreprises multinationales permettent de retrouver dans un grand nombre de pays les mêmes types de produits, toutefois toujours adaptés à chaque pays. L'internationalisation ne supprime pas la diversité et la spécificité.

Entre ces deux types de produits, traditionnels et industriels, se place une large gamme intermédiaire conduisant à des produits variés. Les uns

cherchent à conserver, tout en les adoucissant et en les régularisant, les caractères organoleptiques traditionnels; les autres se rapprochent des qualités «standard» industrielles. Ainsi, il existe sur le marché mondial une immense palette de produits laitiers qui, dans l'ensemble, répondent aux attentes conscientes ou non des différents consommateurs.

Pendant très longtemps, tous les produits laitiers étaient issus d'une matière première unique (le lait) et de technologies voisines. Depuis quelques années, on tend à modifier la composition de certains d'entre eux de façon à renforcer, équilibrer ou alléger leurs qualités nutritives. On cherche aussi à faire des produits dont le lait ou certains de ses constituants ne sont plus les seules matières premières. On en trouve quelques exemples dans les produits allégés en matière grasse, les minarines[1], les huiles de beurre, les beurres et fromages sans cholestérol, les produits laitiers au soja, etc.

Enfin, l'utilisation de procédés nouveaux, comme l'ultrafiltration, conduit à des produits différents dans leur composition et leurs qualités organoleptiques. Si certains de ces produits nouveaux cherchent à répondre aux recommandations des nutritionnistes et des hygiénistes, beaucoup, par la diversification qu'ils apportent, répondent surtout à des intérêts commerciaux.

PRODUCTION LAITIÈRE ET CONSOMMATION DES PRODUITS LAITIERS

Les paragraphes qui suivent n'ont pas pour but de couvrir ces questions en détail, mais seulement de faire ressortir quelques faits saillants qui permettent de replacer cette étude de nutrition dans un contexte plus global.

Production

La production laitière mondiale est estimée par la FAO à 537 millions de tonnes pour l'année 1990, dont 88,8 pour cent proviennent du lait de vache, 7,7 pour cent de celui de bufflonne, 1,7 pour cent de celui de brebis et 1,9 pour cent de celui de chèvre. L'homme utilise aussi le lait d'autres mammi-

[1] Margarine à faible teneur en matières grasses utilisée dans certains pays européens.

TABLEAU 37

Répartition de la production laitière dans le monde en 1990, par région et par espèce (%)

Régions (ou groupes de pays)	Vache	Bufflonne	Brebis	Chèvre
Amérique du Nord[1]	15,7			
Europe[2]	35,2	0,3	41,0	18,2
Océanie[3]	2,9			
Ex-URSS	22,8		0,8	3,4
Autres pays développés[4]	2,4		0,2	0,2
Afrique[5]	1,9		9,9	16,2
Amérique latine et Caraïbes	8,7			3,2
Proche-Orient[6]	2,0	3,7	3,7	23,2
Extrême-Orient[7]	8,3	96,0	8,6	35,6
Autres pays en développement[8]	–[9]			
Total	100	100	100	100

Notes:
[1] Canada et Etats-Unis
[2] Europe géographique, mais sans les territoires européens de l'ex-URSS.
[3] Australie et Nouvelle-Zélande.
[4] Afrique du Sud, Israël et Japon.
[5] Continent africain sans l'Afrique du Sud, l'Egypte, la Lybie et le Soudan.
[6] Afghanistan, Arabie saoudite, Bahreïn, Chypre, Egypte, Emirats arabes unis, Iran, Iraq, Jordanie, Koweït, Liban, Lybie, Oman, Qatar, Soudan, Syrie, Turquie, Yémen et zone de Gaza.
[7] Asie, sauf ceux mentionnés en [6] et l'ex-URSS.
[8] Regroupe les Bermudes, le Groenland, Saint-Pierre-et-Miquelon et les îles océaniennes.
[9] Insignifiant: moins de 0,1 pour cent.
Source: FAO, 1991.

fères (chamelle, jument, anesse, etc.) dont les quantités ne sont pas connues avec une approximation suffisante pour être prises en compte par les statistiques.

Le tableau 37 donne la répartition de la production laitière par espèce et par région. Il met en évidence la place prépondérante de l'Europe, de l'ex-URSS et de l'Amérique du Nord dans la production du lait de vache et celle de l'Asie dans la production du lait de bufflonne.

Le tableau 38 donne la liste des 20 premiers producteurs de lait de vache. On notera que seuls quatre pays en développement (Inde, Brésil, Argentine,

TABLEAU 38

Production de lait de vache entier en 1990, par pays (milliers de tonnes)

Pays	Production
Ex-URSS	108 700
Etats-Unis	67 260
Inde	27 500
France	26 561
Allemagne (ex-RFA)	23 672
Pologne	15 832
Royaume-Uni	15 203
Brésil	15 000
Pays-Bas	11 226
Italie	10 376
Japon	8 190
Nouvelle-Zélande	7 700
Allemagne (nouveaux länders)	7 635
Canada	7 535
Tchécoslovaquie	6 931
Australie	6 435
Argentine	6 400
Mexique	6 332
Espagne	5 825
Irlande	5 402

Source: FAO, 1991.

Mexique) figurent dans cette liste. L'Inde produit à elle seule près des deux tiers de la production mondiale du lait de bufflonne et le Pakistan en produit un quart.

La production de fromage, estimée par la FAO à 1,45 millions de tonnes en 1990, est dominée par quatre pays: les Etats-Unis (21,5 pour cent), l'ex-URSS (14,2 pour cent), la France (9,4 pour cent), l'Allemagne (ex-RFA) (7,8 pour cent); pris ensemble, ces pays fournissent plus de la moitié de la production mondiale. Seize autres pays produisent chacun entre 1 et 5 pour

cent de la production mondiale. Ce sont, par ordre décroissant de production, l'Italie, les Pays-Bas, la Pologne, le Royaume-Uni, l'Egypte, le Danemark, le Canada, l'Argentine, l'Allemagne (nouveaux länders), la Tchécoslovaquie, la Grèce, la Bulgarie, l'Iran, l'Australie, l'Espagne et la Chine. Comme pour le lait de vache frais, on constate la part importante des pays développés dans la production de fromage (87,5 pour cent de la production totale). On constate aussi des différences entre cette liste et celle du tableau 38: tous les pays de grand cheptel laitier n'ont pas une tradition fromagère, et inversement. Ainsi, la Grèce, la Bulgarie, l'Egypte et l'Iran produisent des quantités assez importantes de fromage sans figurer parmi les 20 premiers producteurs de lait.

Pour le beurre et le ghee (beurre liquide clarifié par ébullition produit essentiellement en Extrême-Orient), la production mondiale est estimée à 7,8 millions de tonnes en 1990 et est assurée pour plus de la moitié par quatre pays, à savoir l'ex-URSS (23,2 pour cent), l'Inde (12,5 pour cent), les Etats-Unis (7,8 pour cent) et la France (6,8 pour cent). Seize autres pays contribuent pour plus de 1 pour cent à la production. Ce sont, par ordre décroissant l'Allemagne (ex-RFA), la Pologne, le Pakistan, l'Allemagne (nouveaux länders), la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Tchécoslovaquie, l'Irlande, le Royaume-Uni, la Turquie, l'Australie, le Canada, le Danemark, l'Union Belgique-Luxembourg, l'Italie et l'Egypte. La prépondérance des pays développés est globalement moins marquée puisqu'ils n'assurent qu'un peu moins de 75 pour cent de la production totale de beurre et de ghee.

L'industrie laitière met à la disposition du consommateur, en plus du lait frais, du lait concentré, du lait entier en poudre et du lait écrémé en poudre, dont les productions mondiales estimées, en 1990 sont, respectivement, de 4,6, 2,1 et 4,2 millions de tonnes. Le lait écrémé en poudre est produit à raison de 97,1 pour cent dans les pays développés.

Consommation

La consommation du lait et des produits laitiers n'est connue avec précision que pour les pays développés. Par contre, la FAO réunit pour tous les pays des données donnant la quantité disponible, par personne et par an, de lait

et produits laitiers (le beurre étant exclu) exprimés en équivalent-lait, ainsi que la quantité disponible de beurre. La grandeur «quantité disponible»[2] est calculée à partir de la production, du solde importation-exportation, des pertes, et des changements dans les stocks. Elle ne correspond pas à la consommation réelle, qui ne peut être connue que par une enquête de consommation alimentaire, mais elle en constitue une approximation qui permet les comparaisons internationales à un moment donné et l'étude de séries chronologiques pour un pays donné.

Consommation apparente du lait et de produits laitiers en 1988-1990. Le tableau 39 récapitule la consommation apparente, en 1988-1990, de lait et de produits laitiers dans les pays où cette quantité est élevée. On retrouve, dans ce tableau, la plupart des pays développés, à l'exception de l'ex-URSS, de la Roumanie, de la Yougoslavie, de la Hongrie, de l'Espagne, du Portugal, du Japon et de l'Afrique du Sud. Seuls deux pays en développement y figurent, la Somalie et l'Uruguay.

Parmi les pays qui ont une consommation apparente comprise entre 91,3 et 182,6 kg/personne/an, on remarque notamment plusieurs pays du Proche-Orient (Liban, Syrie, Jordanie, Koweït, Arabie saoudite, Emirats arabes unis, Soudan, Lybie), les pays européens qui n'étaient pas inclus dans les pays à consommation apparente élevée, plusieurs pays des Caraïbes (Barbade, Bahamas, Dominique, Cuba) et quelques pays d'Amérique centrale (Mexique, Costa Rica) et du Sud (Argentine, Venezuela). Parmi les pays où la consommation apparente est faible, on trouve tous les pays de l'Afrique au sud du Sahara et un grand nombre de pays d'Amérique latine et d'Extrême-Orient.

Evolution de la consommation apparente de lait et de produits laitiers dans les deux dernières décennies. Pour chaque pays, la consommation apparente de lait et de produits laitiers par personne et par an a évolué au cours des deux dernières décennies. Cette évolution est jugée sur des

[2] On dit aussi «consommation apparente».

TABLEAU 39

Quantité disponible de lait et de produits laitiers (beurre exclu), par pays (kg/personne/an)

Pays	Quantité disponible
Quantité supérieure à 243,4 kg/an (soit 666 g/jour)	
Autriche	251,3
Finlande	337,7
France	277,7
Allemagne (nouveaux länders)	251,8
Allemagne (ex-RFA)	243,5
Islande	302,2
Irlande	323,1
Pays-Bas	298,5
Italie	261,7
Nouvelle-Zélande	267,4
Norvège	278,5
Suède	324,7
Etats-Unis	247,0
Quantité comprise entre 182,6 et 243,4 kg/an (soit entre 500 et 666 g/jour)	
Australie	216,6
Belgique-Luxembourg	207,8
Bulgarie	201,3
Canada	228,7
Tchécoslovaquie	196,7
Danemark	205,6
Grèce	229,4
Israël	212,6
Malte	183,0
Pologne	234,7
Somalie	206,6
Royaume-Uni	232,7
Uruguay	206,6

Note: Les données indiquées correspondent à la moyenne du triennium 1988-1990.
Sources: Données FAOSTAT.

moyennes triennales mobiles établies comme suit: 1969-1971, 1979-1981, 1984-1986 et 1988-1990.

En ce qui concerne l'évolution dans les pays développés, quatre schémas différents ont été observés (figure 7):

- Pays où cette quantité disponible baisse soit constamment, soit à partir d'une certaine date: Islande, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Pologne et Suède.
- Pays où cette quantité disponible reste pour ainsi dire constante: Australie, Canada, Danemark, Etats-Unis, Finlande, Irlande, Royaume-Uni, Tchécoslovaquie.
- Pays où cette quantité disponible s'accroît puis se maintient en plateau: Allemagne (nouveaux länders), Autriche, Bulgarie, Espagne, Italie, Yougoslavie.
- Pays où cette quantité disponible s'accroît du début à la fin de la période considérée: Allemagne (ex-RFA), Belgique-Luxembourg, France, Grèce, Hongrie, Israël, Portugal.

Il convient de noter que, dans les pays scandinaves et aux Pays-Bas, les autorités, conscientes des dangers liés à une consommation élevée de produits animaux riches en acides gras saturés et en cholestérol, facteurs de risque des maladies cardio-vasculaires, ont établi des recommandations dans le cadre de politiques de nutrition. En Pologne, par contre, il faut probablement y voir la conséquence du retrait des subventions à la consommation qui a entraîné une augmentation des prix. On notera également que, dans tous les pays des deux premières catégories (à l'exception de la Tchécoslovaquie), la quantité disponible était supérieure à 200 kg/an en 1969-1971 et qu'à l'inverse, dans tous les pays des deux dernières catégories (à l'exception de la France), la quantité disponible était inférieure à 200 kg/an à la même période.

Il faut souligner que la grandeur étudiée regroupe le lait et les produits laitiers et donc des éléments qui peuvent varier en sens opposé. Déjà, en 1976, les travaux de Debry et Féron soulignaient que, de 1965 à 1974, la consommation de protéines du lait et des produits laitiers est restée constante en France, mais que cette constance résulte d'un accroissement de celle des fromages et du lait écrémé et d'une baisse de celle du lait entier.

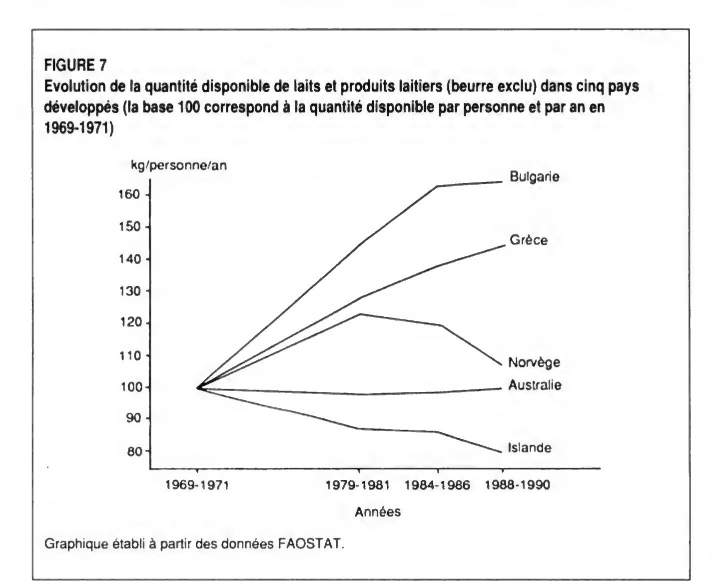


FIGURE 7
Evolution de la quantité disponible de laits et produits laitiers (beurre exclu) dans cinq pays développés (la base 100 correspond à la quantité disponible par personne et par an en 1969-1971)

Graphique établi à partir des données FAOSTAT.

Dans un nombre important de pays en développement, la quantité disponible de lait et de produits laitiers par personne et par an est faible. On se bornera ici à noter l'influence, sur cette grandeur, de phénomènes majeurs qui affectent la vie dans les pays. Comme on pouvait s'y attendre, les sécheresses entraînent une diminution de la quantité disponible; ainsi, de 1969-1971 à 1988-1990, elle baisse de 42 pour cent au Niger, de 32 pour cent au Mali et de 19 pour cent en Mauritaine. De même, elle diminue dans les pays où des troubles civils opposent des groupes rivaux: baisse, par exemple, de 50 pour cent au Nicaragua, de 36 pour cent en Afghanistan, de 33 pour cent au Tchad et de 21 pour cent en Somalie (dans ces deux derniers pays, les effets de ces troubles se conjuguent avec ceux de la sécheresse). Les booms pétroliers ont provoqué un accroissement de la quantité disponible dans plusieurs pays exportateurs de pétrole, dont l'effet perdure en Arabie

saoudite, en Lybie, dans les Emirats arabes unis et en Algérie, mais n'a été que temporaire à la Trinité-et-Tobago.

Consommation apparente de beurre en 1988-1990. La consommation apparente de beurre est estimée de la même manière que celle du lait et des produits laitiers. Le tableau 40 récapitule les pays où la quantité disponible est d'au moins 3 kg/personne/an. La plupart des pays développés y figurent, avec quelques exceptions notables: Espagne, Etats-Unis, Grèce, Italie et Portugal. La présence, dans cette liste, de pays qui ne sont pas d'importants producteurs de lait (Emirats arabes unis, Fidji, Koweït et Singapour) montre l'émergence de nouveaux modèles de consommation à partir des importations.

Evolution de la consommation apparente de beurre entre 1969-1971 et 1988-1990. L'évolution de la consommation apparente diffère de manière frappante. Dans certains pays, elle a baissé tout au long de cette période: c'est le cas de l'Australie, du Canada, du Danemark, des Emirats arabes unis, de la Finlande, de l'Irlande, de la Norvège, du Royaume-Uni et de la Turquie. Pour nombre de ces pays, elle traduit la mise en garde contre la consommation excessive de produits animaux par les autorités scientifiques. La baisse de la consommation est particulièrement spectaculaire en Australie, en Finlande et au Royaume-Uni, où elle atteint, respectivement, 67, 50 et 52 pour cent. Dans d'autres pays, comme l'Allemagne (ex-RFA) et l'Islande, elle est assez limitée, tandis qu'elle est apparue plus tardivement en Allemagne (nouveaux länders), à Fidji, en Nouvelle-Zélande et en Suède. En France, elle est pour ainsi dire stable.

Enfin, dans d'autres pays (Bulgarie, ex-URSS, Koweït, Pays-Bas, Pologne et Tchécoslovaquie), elle a augmenté au cours de la période considérée, mais tend à se maintenir en plateau. La figure 8 visualise ces différents types d'évolution. En 1991 et 1992, la consommation de beurre dans l'ex-URSS a baissé en raison d'une réduction des importations qu'imposent le manque de devises et la rupture des courants commerciaux à l'intérieur de l'ex-COMECON.

TABLEAU 40

Quantité disponible de beurre, par pays (kg/personne/an)

Pays	Quantité disponible
Allemagne (nouveaux länders)	14,4
Nouvelle-Zélande	10,7
France	9,3
Tchécoslovaquie	8,6
Belgique-Luxembourg	8,5
Pologne	8,4
Irlande	8,0
Ex-URSS	7,7
Finlande	7,5
Allemagne (ex-RFA)	7,4
Suède	6,4
Danemark	6,3
Suisse	6,2
Islande	6,0
Autriche	5,1
Bermudes	4,9
Fidji	4,2
Royaume-Uni	4,2
Emirats arabes unis	3,9
Pays-Bas	3,9
Canada	3,8
Singapour	3,2
Australie	3,1
Koweït	3,1
Norvège	3,1
Bulgarie	3,0

Note: Les données indiquées correspondent à la moyenne du triennium 1988-1990.
Source: FAO, données FAOSTAT.

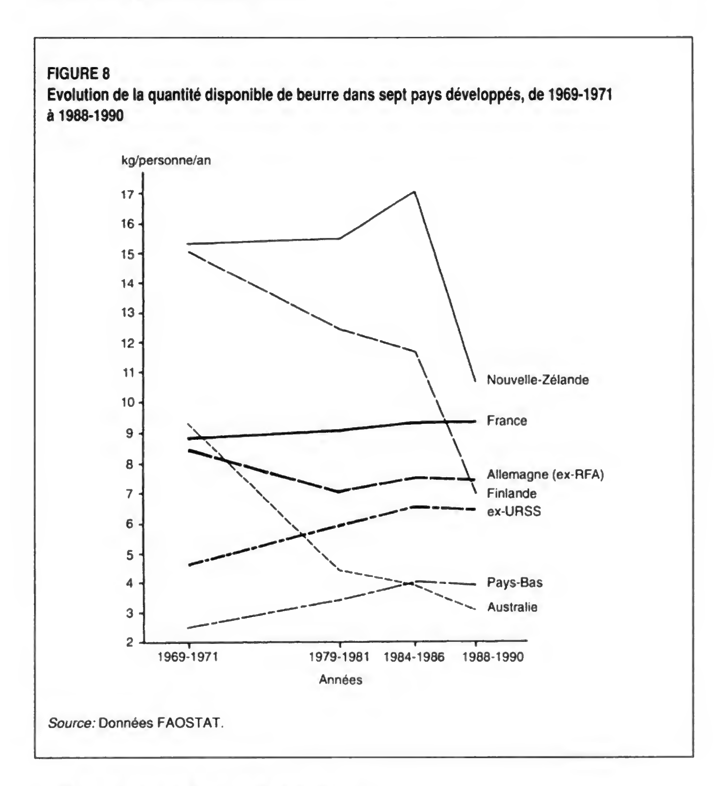


FIGURE 8
Evolution de la quantité disponible de beurre dans sept pays développés, de 1969-1971 à 1988-1990

Source: Données FAOSTAT.

Produits laitiers et aide alimentaire

A côté des céréales, le lait écrémé en poudre (LEP) a été longtemps un composant très fréquent du panier alimentaire des programmes d'aide alimentaire. D'autres produits laitiers (beurre clarifié et mélanges de farines pour enfants) ont pu aussi y figurer, mais en bien moindre quantité. L'aide alimentaire aux pays en développement a distribué près de 332 000 tonnes de LEP en 1981, puis plus de 364 000 tonnes en 1984 (les livraisons de 1984

et de 1985, plus importantes, répondent à des catastrophes, en particulier à la sécheresse au Sahel). Cependant, depuis quelques années, on assiste à une diminution marquée des livraisons de LEP dans les programmes d'aide alimentaire. Ainsi, ces livraisons ont-elles été seulement de 209 000 tonnes en 1989 et de 94 000 tonnes en 1990. A un moment où les grands pays producteurs et exportateurs (Amérique du Nord, Australie, Communauté européenne) prennent des mesures de contingentement de la production, la communauté internationale et, en particulier, les organisations des Nations Unies œuvrant dans le domaine de la nutrition, de la santé et de l'aide alimentaire ont souligné le danger d'infections par le lait en poudre mal préparé. Des directives ont été élaborées, insistant sur la nécessité d'en limiter l'emploi aux programmes dans lesquels on est assuré qu'il sera préparé et employé dans de bonnes conditions d'hygiène et sous la supervision d'un personnel bien formé. En 1990, l'Afrique a été de loin le principal bénéficiaire des envois de LEP dans les programmes d'aide alimentaire. Elle en a reçu plus de la moitié (48 000 sur 94 000 tonnes), l'Ethiopie arrivant en tête des pays bénéficiaires.

TECHNOLOGIE DES PRODUITS LAITIERS

Le lait ou certains de ses composants constituent la matière première d'un grand nombre de produits obtenus à l'aide de procédés variés, essentiellement de nature physique et/ou biochimique.

La microbiologie intervient dans la plupart des opérations de transformation et de conservation du lait et des produits laitiers. Elle a un rôle dominant dans la transformation du lait, tout particulièrement en fromagerie. La conservation du lait et des produits qui en sont issus constitue une préoccupation majeure de la production à la consommation. La principale cause d'altération est le développement des micro-organismes; en outre, ceux-ci peuvent entraîner un risque sanitaire important.

Pour assurer la conservation et l'assainissement des produits, la technologie fait appel à divers procédés, essentiellement d'ordre physique, appliqués seuls ou en combinaison. Parmi ces procédés, on peut citer:

- La destruction partielle ou totale des micro-organismes, généralement au moyen de la chaleur (pasteurisation, stérilisation). A signaler aussi

l'emploi des rayons ionisants ou des antiseptiques, encore qu'il fasse généralement l'objet d'une réglementation stricte, voire d'interdictions.

- L'inhibition de la croissance de la microflore par le froid (réfrigération, congélation).
- La création d'un milieu ou de conditions défavorables au développement microbien: élimination de l'eau libre (concentration, déshydratation), abaissement de la disponibilité de l'eau (salage, sucrage), abaissement du pH (fermentation lactique), conservation en atmosphère modifiée (CO_2).
- La séparation des micro-organismes (centrifugation, microfiltration).

Le tableau 41 donne un schéma des principales utilisations du lait en fonction des traitements qui lui sont appliqués.

MICROFLORE DU LAIT

Le lait peut être ensemencé par de nombreuses espèces microbiennes. Pour certaines, il constitue un bon milieu de culture, ce qui leur permet de s'y développer. Pour d'autres germes banals ou pathogènes, il n'est qu'un véhicule occasionnel.

Ensemencement du lait

Le lait d'un animal parfaitement sain, trait aseptiquement, est normalement dépourvu de micro-organismes. A la sortie de la mamelle, le nombre de germes est très faible, généralement inférieur à 5 000/ml. Ils proviennent de l'extérieur et pénètrent dans la mamelle par le canal du trayon. Dans le cas d'infections de la mamelle, le nombre de germes augmente peu (sauf dans le cas de mammites cliniques), mais il sont en majorité constitués de bactéries pathogènes, notamment staphylocoques ou streptocoques. Ainsi, hormis les maladies de la mamelle, l'ensemencement du lait se fait pour l'essentiel au cours des diverses manipulations dont il est l'objet à partir de la traite.

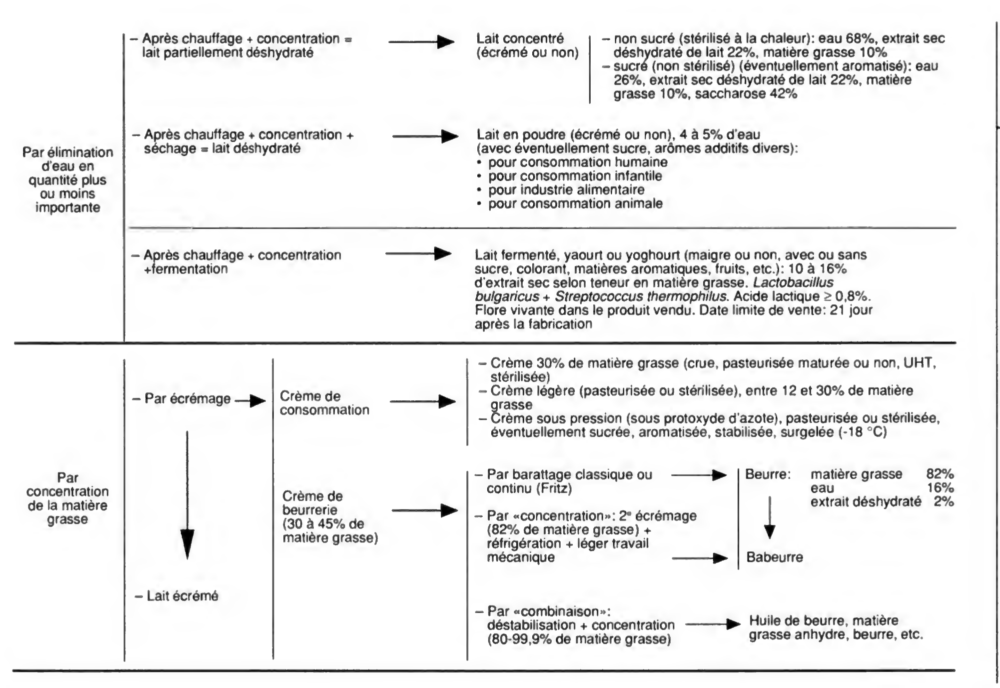
Le niveau de contamination est étroitement dépendant des conditions d'hygiène dans lesquelles sont effectuées ces manipulations, à savoir l'état de propreté de l'animal et particulièrement celui des mamelles, du milieu environnant (étable, local de traite), du trayon, du matériel de récolte du lait

TABLEAU 41

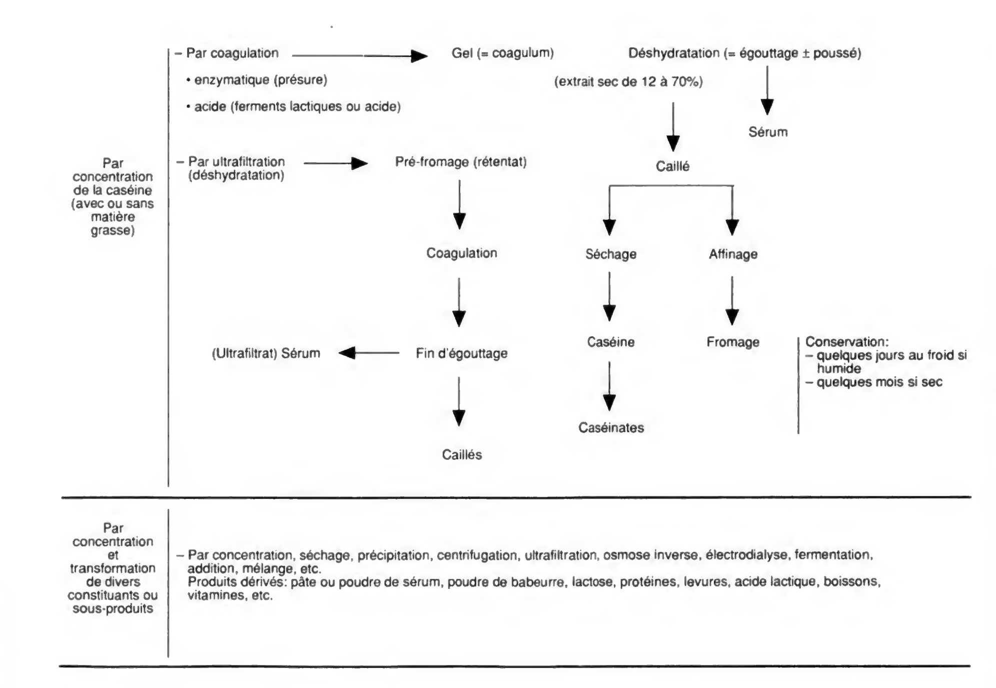
Principales utilisations du lait

Sans modification de sa composition (sauf standardisation ou écrémage)	– Après refroidissement	Température < 15 °C Température < 0 °C	Lait cru (conservation quelques heures) Lait congelé (conservation longue durée)	LAITS DE CONSOMMATION
		Température < 100 °C suivi du refroidissement	Lait thermisé	
		Température < 6 °C en mois de 1 heure	Lait pasteurisé (conditionné ou non) (chauffage entre 63 °C, 30 minutes et 95 °C, instantané) Exemple: HTST: 72 °C, 15 secondes (conservation 3 jours à température ≤ 10 °C)	
	– Après chauffage	Température = 100 °C	Lait bouilli (100 °C)	
		Température > 100 °C Lait de longue conservation	Lait stérilisé (nature ou aromatisé) 1. Conditionnement en récipient clos 2. Stérilisation à 115-120 °C, 20 minutes ou 1. Préstérilisation en flux continu à 130-140 °C, 3 à 4 secondes 2. Conditionnement en récipient clos 3. Stérilisation à 115-120 °C; 20 minutes (conservation plusieurs mois) Lait stérilisé UHT 1. Chauffage à 140-150 °C, 1 à 3 secondes 2. Conditionnement aseptique (conservation plusieurs mois)	
	– Après chauffage et fermentation	– Kéfir, koumis (levures + bactéries lactiques) – Lait *acidophilus*	Acide lactique ≤ 0,6 %	LAITS FERMENTÉS
	– Après chauffage et solidification	– Laits aromatisés emprésurés (sucre + matières aromatiques + présure) Conservation quelques jours à température < 10 °C) – Laits gélifiés aromatisés (sucre + matière aromatique + gélifiant ou épaississant + éventuellement crème) (conservation quelques jours à température < 10 °C		LAITS DESSERTS

[1] La dénomination «lait-boisson» peut s'appliquer aux lait pasteurisé de haute qualité homogénéisé, lait stérilisé UHT, laits aromatisés.
[2] Teneur en matière grasse, en g/kg: 35 minimum pour le lait entier normalisé, entre 15 et 18 pour le lait demi-écrémé, 3 maximum pour le lait écrémé.



Par élimination d'eau en quantité plus ou moins importante	– Après chauffage + concentration = lait partiellement déshydraté →	Lait concentré (écrémé ou non)	– non sucré (stérilisé à la chaleur): eau 68%, extrait sec déshydraté de lait 22%, matière grasse 10% – sucré (non stérilisé) (éventuellement aromatisé): eau 26%, extrait sec déshydraté de lait 22%, matière grasse 10%, saccharose 42%	
	– Après chauffage + concentration + séchage = lait déshydraté →	Lait en poudre (écrémé ou non), 4 à 5% d'eau (avec éventuellement sucre, arômes additifs divers): • pour consommation humaine • pour consommation infantile • pour industrie alimentaire • pour consommation animale		
	– Après chauffage + concentration +fermentation →	Lait fermenté, yaourt ou yoghourt (maigre ou non, avec ou sans sucre, colorant, matières aromatiques, fruits, etc.): 10 à 16% d'extrait sec selon teneur en matière grasse. *Lactobacillus bulgaricus* + *Streptococcus thermophilus*. Acide lactique ≥ 0,8%. Flore vivante dans le produit vendu. Date limite de vente: 21 jour après la fabrication		
Par concentration de la matière grasse	– Par écrémage →	Crème de consommation →	– Crème 30% de matière grasse (crue, pasteurisée maturée ou non, UHT, stérilisée) – Crème légère (pasteurisée ou stérilisée), entre 12 et 30% de matière grasse – Crème sous pression (sous protoxyde d'azote), pasteurisée ou stérilisée, éventuellement sucrée, aromatisée, stabilisée, surgelée (-18 °C)	
		Crème de beurrerie (30 à 45% de matière grasse) →	– Par barattage classique ou continu (Fritz) →	Beurre: matière grasse 82%, eau 16%, extrait déshydraté 2%
			– Par «concentration»: 2[e] écrémage (82% de matière grasse) + réfrigération + léger travail mécanique →	↓ Babeurre
	– Lait écrémé		– Par «combinaison»: déstabilisation + concentration (80-99,9% de matière grasse) →	Huile de beurre, matière grasse anhydre, beurre, etc.


Par concentration de la caséine (avec ou sans matière grasse)
– Par coagulation
• enzymatique (présure)
• acide (ferments lactiques ou acide)
Gel (= coagulum)
Déshydratation (= égouttage ± poussé)
(extrait sec de 12 à 70%)
Sérum
Caillé
Séchage
Affinage
Caséine
Fromage
Caséinates
Conservation:
– quelques jours au froid si humide
– quelques mois si sec
– Par ultrafiltration (déshydratation)
Pré-fromage (rétentat)
Coagulation
Fin d'égouttage
(Ultrafiltrat) Sérum
Caillés
Par concentration et transformation de divers constituants ou sous-produits
– Par concentration, séchage, précipitation, centrifugation, ultrafiltration, osmose inverse, électrodialyse, fermentation, addition, mélange, etc.
Produits dérivés: pâte ou poudre de sérum, poudre de babeurre, lactose, protéines, levures, acide lactique, boissons, vitamines, etc.

Par d'autres procédés	Outre les utilisations «classiques», le lait ou certains de ses constituants sont utilisés comme matière première pour la préparation de produits alimentaires variés considérés comme «produits laitiers».

Exemples:

– **Fromage fondu:** produit pâteux obtenu par la fonte à la chaleur (90 °C) de fromages divers (gruyère), éventuellement additionnés de produits laitiers (lait en poudre, crème, beurre, caséine, lactosérum) et d'autres denrées (aromates, jambon, noix, etc.). La fonte se fait en présence de sels (sels de fonte) dissolvants et émulsifiants et d'acides organiques faibles (citrates et phosphates de soude, etc.) permettant de fixer le pH à une valeur favorable au maintien de l'émulsion de la matière grasse dans la pâte et à une bonne texture et à une valeur défavorable au développement des micro-organismes (pH 5,6 à 5,8).

Fromage fondu	matière sèche ≥ 50%	matière grasse ≥ 40%
Fromage fondu pour tartine	matière sèche = 44 à 50%	matière grasse ≥ 40%
Fromage fondu pour tartine	matière sèche = 20 à 30%	matière grasse ≥ 31%

Fromage fondu en poudre = fromage fondu dilué à l'eau puis desséché par pulvérisation dans un courant d'air chaud. Produit destiné à la préparation de biscuits et de produits diététiques.

– **Crèmes dessert:** mélange de lait concentré ou non, enrichi ou non de crème, de sucre, d'arômes naturels et d'additifs (stabilisateurs, épaississants, etc.).

– **Crèmes glacées:** produits obtenus par congélation d'un mélange pasteurisé de lait, crème, sucre, fruits ou jus de fruits ou arômes naturels additionnés de stabilisateurs et éventuellement de colorants. Matière grasse 5 à 7%, saccharose 14%, matière sèche 29 à 31%.

– **Laits reconstitués:**
- Lait reconstitué: mélange de lait écrémé en poudre et d'eau en proportions permettant d'obtenir un produit dont la matière sèche est voisine de celle du lait liquide écrémé (90 g/litre).
- Lait recombiné: mélange de lait écrémé en poudre, de matière grasse laitière, anhydre et d'eau permettant d'obtenir un produit dont la matière sèche est voisine de celle du lait liquide entier (125-130 g/litre) ou partiellement écrémé.
- Lait coupé (toned milk): mélange de lait de bufflesse (ou autre), de poudre de lait écrémé et d'eau.

– **Produits d'imitation:** aliments préparés à partir de lait ou de certains de ces constituants (protéines, dont caséinates, etc.) et de diverses denrées d'origine végétale ou animale.
- Lait imitation (filled milk): soit une émulsion de matière grasse végétale (huile de coton, arachide, coco, etc.) dans du lait écrémé frais ou reconstitué, soit une émulsion de matière grasse végétale dans un liquide dont aucun constituant ne vient du lait à l'exception des protéines (caséinate).
- Crème imitation (fouettée ou non) à base d'huile végétale, sucre, caséinate et additifs divers.
- Fromages imitation où la matière grasse butyrique est remplacée par de la graisse végétale.
- Produits divers à base de lait, soja, etc.

– **Lait spéciaux** (liquides ou secs): laits dont la composition a été modifiée afin de les adapter aux besoins spécifiques de catégories particulières de consommateurs (nourrissons, malades, etc.). Ils comprennent les laits infantiles, diététiques, médicamenteux, irradiés, etc.

(seaux à traire, machines à traire) et, enfin, du matériel de conservation et de transport du lait (bidons, cuves, tanks). A noter qu'il est généralement moins élevé dans le cas de la traite manuelle que dans la traite mécanique, car cette dernière met en œuvre un équipement plus important et plus difficile à nettoyer.

Développement des micro-organismes

Trois facteurs principaux conditionnent la croissance microbienne: le nombre initial de germes, la température et la durée de conservation. A la sortie de la mamelle, le lait est à la température de l'animal (37 °C). Malgré cette condition favorable à la multiplication de nombreux germes, celle-ci est inexistante pendant les quelques heures qui suivent la traite, en raison du pouvoir bactériostatique du lait frais. Dans la mesure où l'on dispose des moyens nécessaires, il est hautement souhaitable de profiter de cette période pour refroidir le lait afin de ralentir la prolifération des micro-organismes dès la phase bactériostatique passée.

Le tableau 42 montre l'influence des facteurs précités sur la croissance des bactéries aérobies mésophiles (improprement appelées «flore totale») à différentes températures. En prenant, par exemple, les valeurs de ce tableau, et si l'on admet qu'un lait de qualité moyenne ne doit pas contenir plus de un million de germes par ml au moment de son traitement, on voit que lorsque sa population initiale est faible, il peut se conserver 4 jours à 4,5 °C, un peu plus de 3 jours à 10 °C et moins de 24 heures à 15,5 °C et à 25 °C. Lorsque la contamination est importante, il supporte une conservation de 4 jours à 4,5 °C mais, lorsque la température atteint 10 °C, il n'est déjà plus conforme en 24 heures. Or, dans la pratique, la charge microbienne pouvant être plus forte et les normes choisies plus sévères, on observe que, même à la température de 4,5 °C, le refroidissement est insuffisant. Il importe donc d'obtenir à la production un lait très peu chargé en micro-organismes (si possible moins de 100 000 germes/ml) et de refroidir ce lait le plus rapidement possible après la traite, à une température la plus proche de 0 °C et jamais supérieure à +4 °C (en pratique de +2 °C à +4 °C).

Le temps de conservation reste de toute façon étroitement lié à la charge

TABLEAU 42

Multiplication de la flore aérobie mésophile en fonction de la température et de la durée de conservation

Température de conservation (°C)	Nombre de bactéries par ml	Facteurs de multiplication			
		24 heures	48 heures	72 heures	96 heures
4,5	4 200	1	1,1	2	4,7
	137 000	2	3,9	5,5	6,2
10	4 200	3,3	30	136	9 400
	137 000	8,5	98	182	300
15,5	4 200	380	7 860	77 800	229 000
	137 000	175	4 600	17 500	386 000
25	4 200	7 000	15 600	88 500	240 000
	137 000	4 900	11 200	21 000	23 300

TABLEAU 43

Durée maximale de conservation en fonction du nombre de bactéries à l'origine

Nombre de bactéries aérobies mésophiles du lait à l'origine N à 30 °C	Durée maximale de conservation du lait refroidi rapidement dès la traite entre +2 °C et +4 °C
N < 10 000	4 jours
N ≤ 100 000	3 jours
N ≤ 500 000	2 jours
N > 500 000	1 jour ou moins

microbienne du lait mis en refroidissement. Aussi convient-il de respecter le barème indiqué au tableau 43.

Cependant, le refroidissement, même à +4 °C, n'empêche pas certains micro-organismes de se multiplier et de provoquer de graves défauts dans la qualité des produits pouvant même les rendre inconsommables. Il est donc indispensable de limiter au maximum, dès la production, le nombre de ces germes par une excellente hygiène.

Enfin, bactéries, virus, levures et moisissures peuvent être présents dans

le lait. Les bactéries ont une place prédominante dans l'ensemble des problèmes microbiologiques du lait et des produits laitiers, les levures et les moisissures intéressant surtout la fromagerie.

Bactéries

En raison de la grande diversité des bactéries présentes dans le lait, et en se basant sur un certain nombre de propriétés importantes qu'elles ont en commun, on les divise en deux catégories: les bactéries saprophytes et les bactéries pathogènes.

Bactéries saprophytes. Elles peuvent avoir un intérêt technologique, hygiénique ou être indifférentes.

Bactéries lactiques. Elles ont une grande importance en laiterie. Leur principale propriété est de produire de l'acide lactique par fermentation du lactose; certaines produisent en outre du gaz carbonique et divers composés, dont certains contribuent à l'arôme des produits laitiers. Par leur production d'enzymes protéolytiques, elles contribuent à l'affinage des fromages. Dans du lait non réfrigéré, elles tendent à prédominer, donnant à celui-ci une certaine protection vis-à-vis de germes indésirables. Cependant, la production d'acide lactique, en faisant baisser le pH, provoque une déstabilisation progressive de la dispersion micellaire, ce qui rend le lait de moins en moins stable aux traitements thermiques et peut entraîner sa coagulation, même à température ambiante. Le tableau 44 montre l'influence de l'acidité sur la stabilité du lait à différentes températures.

La flore acidifiante du lait n'est pas uniquement constituée de bactéries lactiques. Des bifidobactéries et des entérobactéries interviennent aussi dans l'acidification.

Bactéries coliformes. Presque toujours présentes dans le lait cru, elles ont une grande importance en laiterie. Du point de vue technologique, certaines assurent la fermentation du lactose, produisant, outre des acides, des gaz (hydrogène et gaz carbonique) qui font gonfler les fromages. De plus, elles élaborent diverses substances conférant aux produits des goûts et des odeurs très désagréables. Du point de vue hygiénique, un grand nombre d'entre elles étant les hôtes habituels de l'intestin des mammifères, leur présence

TABLEAU 44

Stabilité du lait à différentes températures en fonction de l'acidité titrable[1] et du pH

pH	Acidité titrable *(g/litre)*	Température *(°C)*	Etat du lait
6,6-6,8	1,6-1,8	0-150	Normal
6,4	2,0	110-120	Floculation
6,3	2,2	100	Floculation
6,1	2,4	72-75	Floculation
5,2	5,5-6,0	20	Floculation

[1] L'expression «acidité titrable» désigne l'acidité mesurée par la méthode classique de la réaction acide-base.

dans le lait (comme dans l'eau) est l'indice d'une contamination fécale. Cet indice est mis à profit dans l'examen de la qualité sanitaire des produits. Certaines espèces peuvent être responsables d'infections gastro-intestinales.

Flore psychrotrophe. On désigne par psychrotrophes des micro-organismes qui ont la faculté de se développer à une température égale ou inférieure à 7 °C, indépendamment de leur température optimale de croissance (en général, dans le lait, c'est le genre *Pseudomonas* qui domine). Dans des laits refroidis, cette flore peut devenir la flore dominante, notamment quand ceux-ci ne sont pas récoltés dans d'excellentes conditions hygiéniques et qu'ils sont maintenus plus de 24 à 48 heures dans les conditions habituelles de réfrigération (+3 à +4 °C). Si l'on tient compte de leur temps de génération, la population des psychrotrophes peut être multipliée par 10 en 24 heures à 4 °C et par 4 à 1 °C. Ces germes peuvent produire des lipases et des protéases thermorésistantes ayant pour conséquence l'apparition de goûts très désagréables dans les produits laitiers: goût amer, rance, putride, etc. La protéolyse peut aussi entraîner une déstabilisation progressive de la dispersion micellaire des laits UHT aboutissant à leur gélification avec altération du goût.

Flore thermorésistante. Un certain nombre de bactéries sont capables de résister aux traitements thermiques usuels utilisés dans le but d'assainir ou

de conserver le lait. Elles sont dites thermorésistantes. Leur développement ultérieur peut altérer les produits et, parfois, être dangereux pour la santé. On distingue:

- La flore thermorésistante totale, définie comme la flore résiduelle après un traitement à 63 °C pendant 30 minutes ou un traitement équivalent tel que la pasteurisation HTST (72 °C pendant 15 secondes).
- La flore moyennement thermorésistante, qui n'est pas détruite par chauffage à 75 °C pendant 12 secondes.
- La flore fortement thermorésistante, qui n'est pas détruite par chauffage à 80 °C pendant 10 minutes. Elle comprend notamment les spores bactériennes, qui nécessitent des températures supérieures à 100 °C.

Les bactéries sporulées rencontrées en laiterie appartiennent aux genres ci-après:

- *Bacillus*, dont les activités enzymatiques peuvent être responsables de l'acidification, la coagulation ou la protéolyse des laits de longue conservation .
- *Clostridia*, qui peuvent provoquer de graves altérations des fromages à pâte dure, mi-dure et fondue. Ces altérations provoquent à leur tour le gonflement des fromages et contribuent à leur donner un goût rance et piquant très désagréable. L'une d'elles, *Clostridium perfringens*, peut être dangereuse par ses toxines.

La flore thermorésistante est notamment apportée dans le lait par le sol, les ensilages, les fèces et les résidus dus à l'insuffisance de nettoyage et de désinfection des matériels en contact avec le lait.

Flore totale. Ce terme est impropre, car la méthode la plus courante consiste à ne dénombrer que la flore aérobie mésophile par comptage des colonies après culture sur plaques de gélose nutritive ensemencées et incubées en aérobiose pendant 3 jours à 30 °C, excluant par conséquent certains germes. Cependant, elle est la méthode la plus courante et la plus pratique pour établir le niveau de contamination globale du lait.

Bactéries pathogènes. Le lait cru et les produits laitiers avec lequel ils sont fabriqués, de même parfois que ceux ayant subi un traitement d'assainissement, peuvent contenir des germes pathogènes pour l'homme. L'animal,

l'environnement et l'homme peuvent être à l'origine de cette contamination. Différentes espèces bactériennes sont capables de pénétrer dans la mamelle par le canal du trayon et sont excrétées avec le lait. En se développant dans la mamelle, certains de ces germes, en particulier les staphylocoques, les streptocoques et les entérobactéries, provoquent des mammites avec contamination du lait.

L'animal peut aussi contaminer indirectement le lait par des particules d'excréments, d'expectorations, et d'autres rejets, ou par le voisinage avec des animaux malades de même espèce ou d'espèces différentes (chèvre, par exemple). Le sol, les eaux, les litières, les poussières, le matériel mal nettoyé, etc., sont d'importantes sources de contamination du lait au cours de la traite et des diverses manipulations qu'il subit. Par ses mains, ses expectorations, ses vêtements souillés, etc., l'homme malade ou porteur sain ou infecté peut être également une cause de contamination de l'animal ou de son environnement et du lait.

Le nombre de germes vivants est important, car l'efficacité de leur destruction par la chaleur (pasteurisation) dépend, en partie, de leur concentration initiale. Si l'on considère que la destruction est de 99 pour cent, la contamination résiduelle peut être négligeable ou, au contraire, importante. Outre leur capacité à se multiplier et à se répandre dans l'organisme, certains germes pathogènes produisent des toxines. Souvent thermostables, elles restent actives après certains traitements thermiques tels que la pasteurisation et la dessiccation.

Les mesures de prévention contre la présence et le développement des pathogènes reposent d'abord sur un bon état sanitaire des animaux et du personnel les entretenant et manipulant le lait; une bonne hygiène générale des animaux, du personnel, des locaux et des matériels (une attention toute particulière doit être portée à l'hygiène de la traite); l'emploi d'eau potable et la conservation du lait au froid. Bien entendu, les traitements d'assainissement du lait (pasteurisation, ébullition, stérilisation) réduisent considérablement les risques de présence de germes dangereux dans la mesure où le lait et ses dérivés ne subissent pas ensuite de recontaminations.

On citera ci-après les germes pathogènes auxquels on accorde une

importance particulière, en raison de la gravité ou de la fréquence des risques qu'ils présentent.

Staphylocoques hémolytiques. On les trouve assez fréquemment dans le lait et, parfois, en nombre important. L'origine de la contamination est la mamelle malade et, peut être plus fréquemment, l'homme. Leur fréquence tend à augmenter du fait de leur antibiorésistance. Ils provoquent par leur production de toxines thermostables des intoxications de gravité variable pouvant être redoutables chez l'enfant. Les produits laitiers responsables sont le plus souvent des laits concentrés et en poudre ainsi que des crèmes glacées. Une fermentation lactique suffisamment active les inhibe. Au cours de l'affinage des fromages, ils disparaissent progressivement, mais le risque subsiste s'il y a eu accumulation préalable de toxines en quantité suffisante.

Entérobactéries. Les salmonelles sont responsables de toxi-infections. Des épidémies de fièvre typhoïde et paratyphoïde ont pour origine la consommation de lait, crème, beurre, crème glacée, etc., n'ayant pas subi de traitement d'assainissement ou recontaminés.

Les colibacilles, tels que *E. coli*, dont certaines souches sont entéropathogènes, peuvent être responsables de graves toxi-infections suite à la consommation de lait ou de produits laitiers infectés. La pollution en bactéries coliformes est très fréquente; même légère, elle présente un risque.

Des coliformes banals absorbés en quantité massive (1 million à 1 milliard de germes) peuvent déclencher des troubles gastro-intestinaux. Ils sont responsables de la «maladie du voyageur». Les *Yersinia* peuvent être responsables de troubles intestinaux variés. Ces germes sont assez fréquents dans le lait et dans les crèmes glacées. Les laits de vache, de chèvre et d'autres espèces sont souvent contaminés par des brucelles dans les pays où il n'a pas été effectué de sérieuses campagnes d'éradication. On trouve encore le bacille tuberculeux de façon parfois importante dans le lait de pays où la prophylaxie est inexistante ou insuffisante. Les infections tuberculeuses dues à la consommation de lait contaminé par la variété bovine ou humaine sont hélas bien connues. La contamination se fait par l'animal ou par l'homme, ce dernier pouvant avoir contaminé l'animal et réciproquement.

Bien d'autres microflores pathogènes peuvent contaminer le lait. Leur

fréquence est très variable et souvent plus importante dans les pays en développement.

Levures

Bien que souvent présentes dans le lait, elles s'y manifestent rarement. Peu d'entre elles sont capables de fermenter le lactose. Certaines sont utilisées dans la production de laits fermentés (comme le kéfir et le koumis), des levures alimentaires et de l'éthanol. En fromagerie, de nombreuses levures participent à l'affinage des fromages. C'est ainsi qu'en se développant à la surface de certains fromages jeunes à morge ou à croûte moisie, elles contribuent à leur désacidification. Par leurs enzymes protéolytiques et lipolytiques, elles jouent un rôle dans la formation de l'arôme.

Les levures peuvent aussi être néfastes. Des *Torulopsis*, productrices de gaz à partir du lactose, supportent des pressions osmotiques élevées et sont capables de faire gonfler des boîtes de lait concentré sucré. Certaines sont responsables de fermentations gazeuses dans les crèmes fermières et les caillés frais. La présence de levures à la surface des yaourts, fromages à pâte fraîche, crème et beurre sont l'indice d'une pollution qui déprécie l'aspect et le goût des produits.

Moisissures

Sans importance dans le lait liquide, elles intéressent un grand nombre d'autres produits laitiers. Elles se développent en surface ou dans les parties internes aérées. Elles sont productrices de lipases et de protéases. Des penicilliums sont utilisés pour recouvrir la croûte des fromages à pâte molle d'une «fleur» blanche et pour former des veines de couleur bleue dans les fromages à pâte persillée. Les levures peuvent aussi participer à la désacidification de la pâte de divers fromages en début d'affinage.

Les mêmes moisissures peuvent aussi être indésirables, par exemple quand un développement excessif de *Geotrichum* à la surface des fromages à pâte molle rend celle-ci glaireuse et coulante ou quand des veines bleues apparaissent dans la «fleur» blanche des camemberts, ce qui les déprécie fortement. L'apparition, à la surface des fromages à pâte molle moisie, de spores de couleur brun-noir dues à d'autres moisissures rend leur commer-

cialisation difficile ou impossible. D'autres moisissures, souvent colorées, peuvent se développer sur divers produits (crème, beurre, fromage, yaourt, poudre de lait). Elles diminuent leur qualité organoleptique. Bien que très généralement sans danger du fait de l'absence de mycotoxines, les produits sur lesquels elles profilèrent sont le plus souvent considérés comme impropres à la consommation.

Chapitre 4
Laits de consommation

LAITS LIQUIDES

Destruction des micro-organismes

Dans le but d'assainir le lait et de prolonger sa durée de conservation, on lui applique généralement un traitement thermique qui détruit partiellement ou complètement sa flore microbienne.

Lorsque l'on soumet une population microbienne à l'action d'une température donnée pendant un temps déterminé, une certaine proportion de cette population est détruite. Ce fait se traduit par deux lois expérimentales. La première loi montre qu'à l'intérieur d'une même espèce et pour un traitement thermique déterminé, le nombre de survivants est fonction de la durée du traitement. La seconde loi fait apparaître que pour une même espèce, et pour obtenir un taux de réduction donné de la population, la durée de traitement nécessaire est fonction de la température de traitement. Ces deux fonctions sont des exponentielles. Leur représentation graphique est la «courbe de survie» pour la première et la courbe du temps de réduction pour la seconde. Une représentation plus commode consiste à porter en ordonnée le logarithme du temps de chauffage et en abscisse la température: on obtient dès lors une droite dite «de survie».

Les lois de destruction des micro-organismes sont de même nature que celle régissant la dégradation des molécules biochimiques du lait. Les effets du chauffage sur les micro-organismes, les enzymes, les protéines et autres constituants du lait, qui déterminent notamment son goût, son aspect, sa valeur nutritive, etc., résultent de l'accroissement de la vitesse de certaines réactions. Des réactions se faisant très lentement à la température ordinaire peuvent s'accomplir à une vitesse très grande, sous l'action de températures élevées. Il a été établi que chaque fois que la température augmente de 10 °C, la vitesse de réaction est multipliée par un facteur à peu près constant, appelé

«coefficient de température». Ce coefficient est de 5 à 10 pour la destruction des spores microbiennes et de 10 à 25 pour la destruction des bactéries.

Il existe, pour chaque espèce microbienne ou chaque souche, ou pour chaque réaction, une droite de combinaisons temps-température délimitant deux domaines. Dans celui de droite apparaît la modification considérée. Pour déterminer les combinaisons temps-température, on établit les courbes de destruction des micro-organismes, ainsi que celles de l'apparition des modifications que l'on veut éviter (par exemple, apparition du goût cuit du lait). Le choix de ces combinaisons est d'autant plus réduit que l'on veut détruire un grand nombre d'espèces microbiennes et d'enzymes tout en respectant l'état du milieu, en évitant des modifications du produit sur le plan organoleptique, nutritionnel et technologique (figure 9).

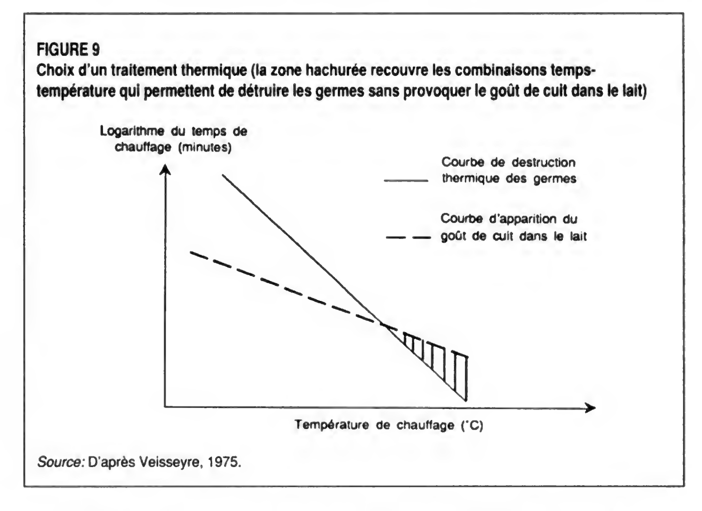
D'une manière générale, les hautes températures appliquées pendant un temps très court ont un effet plus puissant sur la destruction des micro-organismes et des enzymes que sur les modifications des constituants du lait, ce qui justifie l'intérêt des traitements UHT. De plus, en assurant une montée en température et un refroidissement rapides, les procédés UHT évitent les effets cumulatifs des traitements thermiques et réduisent ainsi les modifications physico-chimiques du lait.

Pour caractériser la cinétique de destruction d'une population d'une souche microbienne donnée, à une température donnée et dans un milieu défini, on utilise le «temps de réduction décimale» qui correspond à la destruction de 90 pour cent de la population microbienne, donc à la division par 10 (ou réduction décimale) de son effectif initial. Si, par exemple, il faut 2 minutes pour passer d'une population microbienne de 1 million à 100 000, il faut autant de temps pour passer de 100 000 à 10 000, ou de 10 000 à 1 000.

Le caractère de relativité de la destruction des micro-organismes par la chaleur montre que l'efficacité du traitement thermique est fonction du nombre initial de germes contenus dans le lait. On voit ainsi la nécessité pour assainir un lait, tout en respectant ses qualités originelles, qu'il soit peu chargé en micro-organismes. D'où l'importance de conditions hygiéniques de récolte du lait puis de son refroidissement et de son traitement rapide.

L'efficacité du couple temps-température sur les micro-organismes dépend de plusieurs facteurs, dont:

FIGURE 9
Choix d'un traitement thermique (la zone hachurée recouvre les combinaisons temps-température qui permettent de détruire les germes sans provoquer le goût de cuit dans le lait)



Source: D'après Veisseyre, 1975.

- Le milieu. En solution aqueuse les germes, sont plus facilement détruits qu'en milieu gras (crème) ou déshydraté (lait en poudre). En milieu acide, ils sont plus aisément détruits. Plus le milieu est concentré en sucres, en sels et en protéines, plus la résistance des germes augmente.
- L'état de la population microbienne. La résistance à la chaleur varie avec les espèces et les souches. C'est ainsi que certaines souches d'*Escherichia coli* sont tuées en cinq minutes à 57 °C alors que d'autres résistent 60 minutes à cette température. Les formes végétatives sont en général très sensibles à la chaleur; beaucoup sont détruites en 15 secondes à 72 °C. Par contre, les formes sporulées nécessitent un chauffage supérieur à 100 °C pendant 20 ou 30 minutes. Certaines enzymes microbiennes, notamment des *Pseudomonas*, peuvent ne pas être inactivées par des traitements thermiques de 5 minutes à 130 °C.

Procédés de traitement thermique

Ces procédés ont un objectif commun, à savoir la destruction des germes

pathogènes. Ils se différencient par la durée de conservation qu'ils donnent au lait, conséquence d'une destruction plus ou moins complète des autres micro-organismes. Indépendamment de l'ébullition, dont l'intérêt est incontestable, mais limité au niveau domestique, on distingue deux catégories de traitement:

- la pasteurisation, lorsque le chauffage est inférieur à 100 °C;
- la stérilisation, lorsque le chauffage est supérieur à 100 °C.

Pasteurisation

A la suite de nombreux travaux, on a défini les combinaisons temps-température capables d'assurer la destruction des germes pathogènes. On s'est fondé pendant longtemps sur la destruction du plus thermorésistant, à savoir le bacille tuberculeux, qui nécessite un chauffage de 12 secondes à 72 °C. Actuellement, on prend en compte le bacille *Coxiella burneti* qui nécessite une durée de chauffage de 15 secondes à 72 °C.

A la suite des travaux de Dahlberg (1932), un certain nombre de combinaisons temps-température assurant une destruction équivalente ont été sélectionnées compte tenu d'une marge suffisante de sécurité.

Le lait pasteurisé contient toujours une flore résiduelle (bactéries lactiques, germes saprophytes variés) dont l'importance est notamment liée à la charge microbienne initiale. Son développement doit être empêché en réfrigérant le lait immédiatement et rapidement après chauffage à une température de +2 °C à +4 °C. Même à ces températures, le lait n'est pas totalement stabilisé en raison de la présence éventuelle de germes psychrotrophes thermorésistants.

Pour conserver au lait pasteurisé son caractère hygiénique, il est indispensable de le soustraire aux recontaminations qui ne manquent pas de se produire au cours de la distribution du lait en vrac et qui rendent alors nécessaire son ébullition avant consommation. C'est pourquoi, dès sa réfrigération, le lait pasteurisé doit être conditionné en emballages de détail (bouteilles en verre ou en plastique, cartons, sachets plastique).

La pasteurisation est définie par un chauffage à 72 °C maintenu pendant 15 ou 20 secondes. Elle est souvent désignée sous le nom de procédé *high temperature short time* ou HTST, c'est-à-dire procédé à haute température

et de courte durée. Ce type de pasteurisation est utilisé dans le monde entier. Toutefois, lorsque le lait cru est de qualité microbiologique médiocre ou mauvaise, il faut augmenter la température et le temps de chauffage. C'est ainsi que celle-ci peut atteindre ou dépasser 80 °C avec une durée de chambrage atteignant 1 ou 2 minutes.

L'effet de la pasteurisation HTST bien conduite est tout à fait négligeable sur les qualités organoleptiques et nutritionnelles du lait. Ce n'est que lorsque le traitement est plus sévère qu'apparaissent des modifications défavorables touchant particulièrement la saveur (goût de cuit).

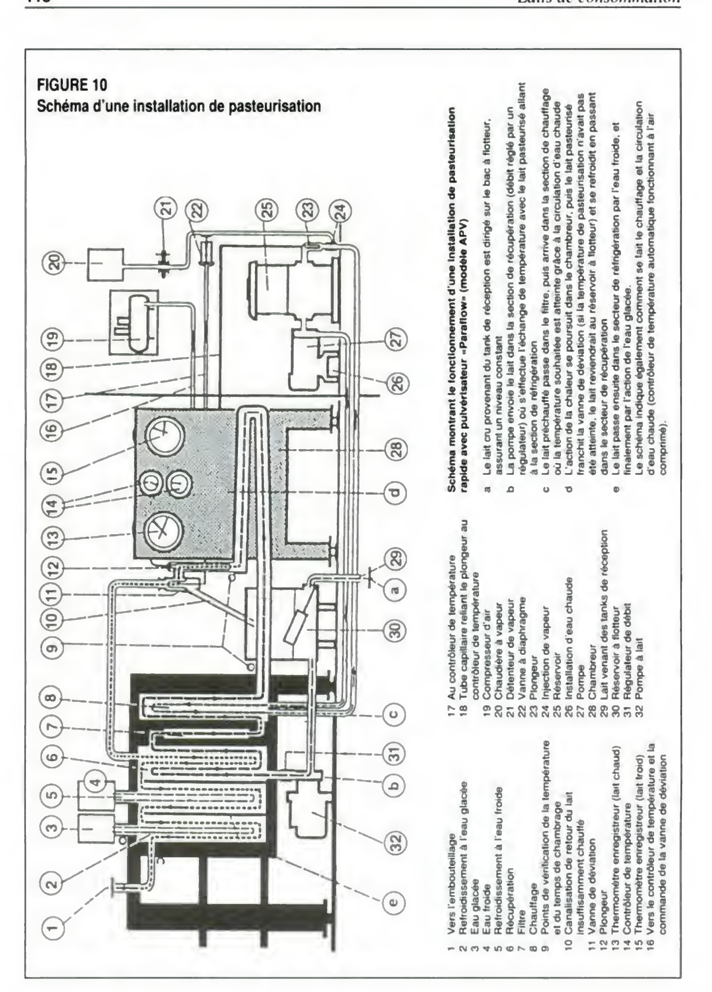
La plupart des appareils utilisés sont constitués par un ensemble de tubes ou plus généralement de plaques entre lesquelles les fluides circulent en continu à contre-courant. Une installation classique comprend les éléments ci-après:

- un échangeur récupérateur dans lequel le lait cru arrivant est réchauffé (vers 60-65 °C) par le lait chaud sortant de l'élément de pasteurisation-chambrage.
- un réchauffeur ou pasteurisateur proprement dit dans lequel le lait arrivant de l'élément 1 est porté à la température de pasteurisation (par exemple 80 °C);
- un chambreur dans lequel le lait venant de l'élément 2 est maintenu à la température de pasteurisation (par exemple 80 °C) pendant le temps voulu (par exemple 20 secondes);
- un échangeur récupérateur (qui est l'élément 1) où le lait venant de l'élément 3 subit un refroidissement (par exemple vers 35 °C) par échange avec le lait cru froid entrant;
- un réfrigérant (comprenant généralement deux sections, l'une d'eau froide, l'autre d'eau glacée ou de saumure) où le lait est refroidi à +3-+4 °C.

L'installation est complétée par divers appareils de contrôle (thermomètres) et de régulation du degré de chauffage et de sécurité (dispositif de déviation du lait insuffisamment chauffé). Elle peut être reliée à un nettoyeur centrifuge, à une écrémeuse, à un homogénéisateur et à un dégazeur. Un schéma d'une installation à plaques est donné à la figure 10.

Les normes et les prescriptions sanitaires concernant le lait pasteurisé

FIGURE 10
Schéma d'une installation de pasteurisation



1 Vers l'embouteillage
2 Refroidissement à l'eau glacée
3 Eau glacée
4 Eau froide
5 Refroidissement à l'eau froide
6 Récupération
7 Filtre
8 Chauffage
9 Points de vérification de la température et du temps de chambrage
10 Canalisation de retour du lait insuffisamment chauffé
11 Vanne de déviation
12 Plongeur
13 Thermomètre enregistreur (lait chaud)
14 Contrôleur de température
15 Thermomètre enregistreur (lait froid)
16 Vers le contrôleur de température et la commande de la vanne de déviation
17 Au contrôleur de température
18 Tube capillaire reliant le plongeur au contrôleur de température
19 Compresseur d'air
20 Chaudière à vapeur
21 Détenteur de vapeur
22 Vanne à diaphragme
23 Plongeur
24 Injection de vapeur
25 Réservoir
26 Installation d'eau chaude
27 Pompe
28 Chambreur
29 Lait venant des tanks de réception
30 Réservoir à flotteur
31 Régulateur de débit
32 Pompe à lait

Schéma montrant le fonctionnement d'une installation de pasteurisation rapide avec pulvérisateur «Paraflow» (modèle APV)

a Le lait cru provenant du tank de réception est dirigé sur le bac à flotteur, assurant un niveau constant
b La pompe envoie le lait dans la section de récupération (débit réglé par un régulateur) où s'effectue l'échange de température avec le lait pasteurisé allant à la section de réfrigération
c Le lait préchauffé passe dans le filtre, puis arrive dans la section de chauffage où la température souhaitée est atteinte grâce à la circulation d'eau chaude
d L'action de la chaleur se poursuit dans le chambreur, puis le lait pasteurisé franchit la vanne de déviation (si la température de pasteurisation n'avait pas été atteinte, le lait reviendrait au réservoir à flotteur) et se refroidit en passant dans le secteur de récupération
e Le lait passe ensuite dans le secteur de réfrigération par l'eau froide, et finalement par l'action de l'eau glacée.
Le schéma indique également comment se fait le chauffage et la circulation d'eau chaude (contrôleur de température automatique fonctionnant à l'air comprimé).

varient selon les pays. En l'absence d'une réglementation, on peut toutefois considérer qu'un lait pasteurisé conditionné est de qualité satisfaisante quand, à la vente au consommateur, il présente les caractères ci-après:

Acidité	1,5 à 1,8 g/litre d'acide lactique
Stabilité à l'ébullition	
Epreuve de phosphatase	négative
Bactéries aérobies mésophiles à 30 °C	moins de 30 000/ml
Bactéries coliformes	moins de 10/ml
Escherichia coli	absence dans 1 ml
Antibiotiques et inhibiteurs	absence

Le lait pasteurisé destiné à être vendu en vrac, à la sortie du pasteurisateur, doit présenter les mêmes caractéristiques. Ensuite, il subit généralement, au cours de la distribution, des recontaminations qui lui font perdre les avantages du traitement thermique, et doit être bouilli avant d'être consommé.

On considère qu'un lait pasteurisé conditionné a une durée de conservation d'environ 8 jours, maintenu à la température de +4 °C à +6 °C. Toutefois, cette durée ne peut être atteinte que dans la mesure où:

- le lait cru n'était pas trop chargé en micro-organismes, notamment en thermorésistants psychrotrophes;
- le lait a subi effectivement en temps et en température le traitement thermique nécessaire;
- le lait n'est pas recontaminé au cours du refroidissement et des opérations diverses intervenant au cours du conditionnement.

Stérilisation

Elle a pour objectif la destruction totale des micro-organismes (y compris les spores), ainsi que des enzymes et des toxines. En fait, la destruction des germes dans les conditions de température et de durée appliquées de façon à altérer le moins possible le lait et notamment ses qualités organoleptiques risque de ne pas être absolue. Des micro-organismes vivants ou revivifiables peuvent subsister. Pour cette raison, le traitement de «stérilisation» vise, en pratique, à obtenir un produit restant stable au cours d'une longue conservation (de 5 à 6 mois), c'est-à-dire exempt de germes susceptibles de s'y

développer et d'y provoquer des altérations. Parmi ces germes seuls les non pathogènes subsistent éventuellement, les plus thermorésistants d'entre eux étant détruits pour des combinaisons temps/température très inférieures. Dans le cas des spores, la plus résistante d'entre elles (celle de *Clostridium botulinum*, d'ailleurs très rare dans le lait), en admettant qu'elle ne soit pas tuée, ne trouverait pas dans le lait «stérilisé» des conditions permettant sa croissance. Ainsi, les risques de non-stérilité n'ont de conséquences éventuelles que sur la conservation du lait. C'est pourquoi la notion de «stérilité» (c'est-à-dire de stérilité absolue) est remplacée par celle de «stérilité commerciale». Bien entendu, cette stérilité n'est maintenue que si le lait est conditionné en récipients hermétiquement clos (récipients en verre, en métal, en matière plastique, en carton).

Le lait destiné à la stérilisation doit être de bonne qualité: peu chargé en micro-organismes et en enzymes thermorésistantes et stable à la chaleur. La stabilité au cours du chauffage varie avec les espèces (le lait de vache est plus stable que celui de chèvre ou de brebis) et avec les races.

Dans la plupart des méthodes modernes de stérilisation, il est recommandé de faire précéder ce traitement proprement dit d'une pasteurisation ou, mieux, d'un chauffage à haute température ou préstérilisation. Cette pratique a un double but:

- élimination d'une part importante des micro-organismes afin de procéder à la stérilisation dans des conditions thermiques moins sévères et de limiter ainsi les modifications du lait;
- amélioration de la stabilité du lait par formation d'un complexe caséine κ/ß-lactoglobuline et abaissement du pH au maximum de stabilité.

Une bonne méthode de préstérilisation consiste en un chauffage du lait en flux continu dans un appareil UHT à 130-140 °C pendant 3 à 4 secondes. Il est ensuite refroidi vers 70-80 °C, homogénéisé puis envoyé à la stérilisation.

L'homogénéisation, indispensable avant la stérilisation des laits complets ou partiellement écrémés, consiste à projeter du lait à 70 °C environ sous forte pression (de 150 à 350 atmosphères) dans une tubulure obstruée par un clapet conique maintenu sur son siège par un ressort dont la tension est réglable. Pour s'écouler, le lait doit vaincre la résistance opposée par le

clapet. Sous l'action du choc contre le clapet, du laminage entre celui-ci et son siège, et de la détente brutale du lait, il se produit un éclatement des globules et une stabilisation de l'émulsion de matière grasse. On distingue deux procédés de stérilisation:

- la méthode classique, qui consiste à stériliser le lait préalablement conditionné en récipients hermétiquement clos;
- la stérilisation en vrac ou en flux continu, suivie du conditionnement aseptique du lait.

Stérilisation en récipients clos

Méthode discontinue. Un premier procédé, le plus simple, consiste à soumettre le lait préalablement mis en bouteilles hermétiquement bouchées à un chauffage à la vapeur, en autoclave, à 120 °C pendant une vingtaine de minutes. La montée et la descente en température sont progressives et lentes. Le goût et la couleur du lait sont altérés, sa teneur en vitamines hydrosolubles est diminuée. Lorsque le lait est fortement contaminé en spores bactériennes, sa stabilité n'est pas assurée.

La méthode est améliorée par l'emploi d'autoclaves rotatifs ou à paniers agités, ce qui accélère les échanges thermiques et permet l'application d'un traitement un peu moins sévère et ainsi de limiter les modifications des propriétés organoleptiques.

Malgré ces améliorations, les appareils fonctionnant de façon discontinue ont l'inconvénient de nécessiter une durée totale de traitement longue due à la lenteur de la montée en température et du refroidissement, ce qui, de plus, est défavorable à la qualité organoleptique du lait. Néanmoins, ils rendent de bons services pour de petites quantités de lait.

Méthode continue. Elle est utilisée lorsque les quantités de lait sont importantes. Les bouteilles sont rapidement portées à la température souhaitée. Dans le cas des bouteilles en verre ou des boîtes en métal, on utilise généralement l'appareil à pression d'eau ou stérilisateur hydrostatique. Celui-ci est constitué de trois colonnes verticales: une colonne ou chambre de stérilisation sous pression de vapeur reliée à l'atmosphère par deux colonnes d'eau symétriques faisant équilibre à la pression qui règne dans la chambre.

Les récipients sont introduits de façon continue dans des supports solidaires d'un transporteur à chaîne parcourant les trois colonnes. Certains appareils permettent leur agitation permanente. Ils passent dans la première colonne qui sert de réchauffeur; le lait y est amené de la température ambiante à environ100 °C. Ils entrent ensuite dans la seconde, ou stérilisateur, où le lait est porté à une température comprise entre 110et 120 °C selon la technique utilisée. Ils vont ensuite dans la troisième colonne où ils sont refroidis.

Le choix de la combinaison temps/température de stérilisation se fait entre deux techniques. L'une consiste en un chauffage pendant 40 minutes à 110 °C; l'autre, pendant 20 minutes à 115-120 °C. Dans tous les cas, il est recommandé de préstériliser le lait à 135-140 °C pendant 3 à 4 secondes.

Lorsque l'on utilise des bouteilles en matière plastique, on utilise généralement des appareils à surpression pneumohydrostatique qui évitent la déformation des récipients. Le lait peut atteindre une température de 127-130 °C.

Stérilisation en vrac ou en flux continu. Les procédés précédents ont l'avantage d'être relativement simples, y compris sur le plan mécanique. Cependant, ils nécessitent un chauffage long qui provoque des modifications, notamment du goût et de la couleur. En cherchant à les réduire, on risque alors des altérations d'origine microbienne et enzymatique.

Par contre, en chauffant le lait à température élevée (135-150 °C) pendant un temps très court (de 1 à 5 secondes), on assure la destruction des microorganismes et des enzymes sans endommager ses propriétés organoleptiques et biochimiques. Ce procédé n'est possible qu'en flux continu. Il s'est généralisé sous le nom de traitement Ultra-Haute-Température ou UHT. Dans la préparation des laits liquides de consommation, il est utilisé:

- soit en préstérilisation, comme vu précédemment;
- soit plus généralement en stérilisation, lorsque celle-ci est suivie d'un conditionnement aseptique et seulement dans ce cas. Il est en effet pratiquement impossible de maintenir la stérilité d'un lait conditionné selon les méthodes utilisées pour le lait pasteurisé, car, au cours des

manipulations de remplissage, même en travaillant très proprement, on récupère toujours quelques germes.

Les procédés UHT mettent en œuvre:

- soit le chauffage indirect dans des échangeurs tubulaires ou à plaques,
- soit le chauffage direct par contact du lait et de vapeur d'eau sous pression.

Le chauffage indirect se fait dans des échangeurs comparables à ceux utilisés pour la pasteurisation, mais adaptés aux conditions du traitement. Les appareils doivent être particulièrement bien étudiés et réalisés en ce qui concerne, notamment, l'écoulement du lait, le transfert de la chaleur et l'homogénéité du chauffage. La température de chauffage est généralement limitée à 145 °C pendant 3 à 4 secondes.

Le chauffage direct se fait par mélange intime de lait et de vapeur, ce qui assure une élévation quasi instantanée de la température du lait vers 140-150 °C et le maintien de celle-ci pendant environ 2 secondes. Une partie de la vapeur se condense dans le lait, ce qui le dilue (d'environ 10 pour cent). Il est donc nécessaire de faire suivre le chauffage d'une évaporation permettant de ramener la matière sèche du lait à sa teneur initiale.

Le chauffage direct peut être réalisé selon deux procédés:

- soit par injection de vapeur dans le lait;
- soit par pulvérisation du lait dans la vapeur.

Les procédés UHT ne se justifient que pour de grosses quantités de lait. La conservation du lait UHT conditionné aseptiquement est en principe de 6 mois à température ambiante (20 °C). Dans les régions chaudes, elle est plus limitée; à 30 °C elle ne peut guère dépasser trois mois.

LAITS DE CONSERVE

Leur fabrication permet de conserver le lait sous un volume réduit et d'en faciliter ainsi le report et l'usage dans le temps et dans l'espace. Ils sont obtenus par chauffage et dessiccation. Un simple apport d'eau permet de reconstituer le lait liquide initial.

On distingue deux catégories de produits:

- les laits concentrés obtenus par dessiccation partielle;
- les laits en poudre obtenus par dessiccation plus poussée.

Laits concentrés

Lait concentré ordinaire. Il est obtenu à partir de lait entier ou de lait écrémé. Après concentration et homogénéisation, il est conditionné en boîtes métalliques et stérilisé à l'autoclave. Selon la norme nº A-3 (1971) du Code des principes FAO/OMS, le lait concentré a une teneur minimum en matière grasse laitière de 7,5 pour cent m/m et une teneur minimum en extraits secs laitiers de 25 pour cent m/m. Le lait écrémé concentré a une teneur minimum en extraits secs laitiers de 20 pour cent m/m.

Lait concentré sucré. Il est obtenu à partir de lait entier ou écrémé et auquel des sucres sont ajoutés qui assurent la conservation du produit sous stérilisation.Selon la norme nº A-4 (1971) FAO/OMS, le lait concentré sucré a une teneur minimum en matière grasse laitière de 8 pour cent m/m et en extraits secs laitiers de 28 pour cent. Le lait écrémé concentré sucré a une teneur minimum en extraits secs laitiers de 24 pour cent m/m.

Le chauffage et la concentration peuvent, faute de précautions particulières au cours de la fabrication, provoquer une instabilité des laits concentrés lors de leur conservation: épaississement, gélification, etc. Ces traitements provoquent notamment une modification de l'équilibre entre les sels insolubles et ceux à l'état dissous et un accroissement de l'instabilité des micelles de phosphocaséinate de calcium. Pour cette raison, on a recours à l'emploi de sels stabilisants (sels de sodium, de potassium et de calcium, des acides chlorhydrique, citrique, carbonique, orthophosphorique et polyphosphorique à la dose maximum exprimée en substance anhydre, de 2 g/kg s'ils sont utilisés seuls et de 3 g/kg s'ils sont utilisés en mélange).

Le préchauffage à haute température (supérieure à 100 °C), outre son action favorable sur la destruction des micro-organismes et des enzymes, a également un effet stabilisant mis à profit dans la plupart des condenseries.

Afin d'éviter un barattage de la matière grasse, on effectue une homogénéisation du lait. Des précautions particulières au cours du refroidissement du lait concentré doivent être prises pour éviter la formation de cristaux d'α-lactose supérieurs à 0,01 mm qui provoquent une texture sableuse.

Dans le cas des laits concentrés sucrés dont la conservation est assurée non par la stérilisation mais par une quantité suffisante de sucre (saccharose) qui,

créant dans le milieu une pression osmotique élevée, empêche le développement des micro-organismes, il faut particulièrement lutter contre la présence de micro-organismes osmophiles, à savoir:

- les levures, qui en assurant la fermentation du lactose produisent des gaz qui provoquent un bombement des boîtes;
- les staphylocoques, dont certains peuvent former des entérotoxines.

Le lait mis en œuvre doit être d'excellente qualité microbiologique, non acide et ne pas floculer lorsqu'il est soumis à ébullition en présence de phosphate monopotassique 5 M. Il est ensuite filtré ou centrifugé de façon à éliminer les impuretés physiques, standardisé puis préchauffé à haute température (105-130 °C pendant quelques secondes).

Méthode de fabrication. La concentration est effectuée généralement par évaporation thermique sous vide. Elle consiste en un transfert de matière et en un transfert de chaleur. Le transfert de matière est le passage de l'eau du lait à l'état de vapeur laissant un liquide résiduel plus concentré. Le transfert de chaleur concerne, d'une part, la chaleur sensible pour le chauffage du lait à concentrer et le refroidissement de celui-ci après concentration ainsi que celui de la vapeur condensée et,d'autre part, la chaleur latente pour l'évaporation et la condensation de l'eau. Ce dernier transfert de chaleur est obtenu par la vapeur de chauffage de l'évaporateur.

La concentration se fait par ébullition dans des évaporateurs ou vacuums, sous vide partiel, de façon à diminuer la température d'ébullition. Il s'agit d'appareils fonctionnant en continu et en multiple effet, c'est-à-dire comprenant plusieurs évaporateurs auxquels on a apporté de nombreuses améliorations visant à réduire les dépenses d'énergie. L'osmose inverse peut être utilisée pour préconcentrer le lait.

Dans le cas du lait concentré sucré, on utilise du saccharose pur, exempt de sucre inverti. Le sucrage du lait se fait avant concentration par addition d'un sirop stérile à 70 pour cent de sucre. La quantité de sucre utilisée pour 100 litres de lait est d'environ 17 kg. La composition des laits concentrés est variable. Les exemples donnés au tableau 45 correspondent à des qualités couramment rencontrées. Les installations de concentration nécessitent un équipement important, complexe et un personnel très qualifié.

TABLEAU 45
Composition des laits concentrés (g/100 g)

Composants	Lait concentré		Lait concentré sucré
	Entier	Ecrémé	
Eau	66	69-70	26
Matière grasse	10	0,5	9
Matiéres azotées	9	12	9
Lactose	13	16	12
Matières minérales	2	3	2
Saccharose	–	–	41
Extrait dégraissé	24	31	23
Matière sèche totale	34	31,5	73

Laits en poudre

Constitués essentiellement de matière sèche de lait et d'une très faible quantité d'eau (de 2 à 4 pour cent) ils ont l'avantage de pouvoir:

- se stocker et se transporter aisément;
- s'utiliser après reconstitution pour la préparation de nombreux produits: laits liquides de consommation, laits fermentés, fromages.

Aux termes de la norme nº A5 (1971) du Code des principes, on distingue trois catégories de lait en poudre, dont la composition est donnée au tableau 46. Selon cette norme, ils peuvent faire l'objet, dans certaines conditions, d'additifs alimentaires (stabilisants, émulsifiants, antiagglomérants).

Les qualités d'une bonne poudre de lait sont les suivantes:

- aptitude à la reconstitution de façon à obtenir facilement un liquide homogène, exempt de particules macroscopiques. Elle est sous la dépendance des propriétés de mouillabilité, de dispersibilité et de solubilité;
- absence de saveurs anormales (goût de cuit, de brûlé, de rance, etc.);
- absence de germes pathogènes (salmonelles, staphylocoques), de toxines et de micro-organismes capables de nuire à sa conservation ou à son utilisation;

TABLEAU 46
Composition des laits en poudre (% m/m)

Composants	Lait entier	Lait partiellement écrémé	Lait écrémé
Matière grasse laitière:			
Minimum	26	>1,5	-
Maximum	<40	<26	1,5
Eau maximum	5	5	5

- absence de substances anormales (antibiotiques) et de résidus divers provenant des conditions de production, de récolte et de conservation du lait initial;
- absence de modifications de la structure et de la composition physico-chimique pouvant nuire à sa valeur nutritionnelle et à ses aptitudes technologiques.

Ces qualités dépendent de la qualité du lait cru mis en œuvre, du traitement thermique du lait, de la méthode de concentration et de séchage et des conditions de stockage.

Plusieurs méthodes permettent de classer les poudres de lait. L'une des plus courantes est l'indice des protéines solubles, le plus souvent désigné par les initiales anglaises WPNI. Elle est fondée sur la quantité de protéines de lactosérum non dénaturées et restées à l'état soluble après traitement thermique. Cette quantité est exprimée en milligrammes d'azote par gramme de poudre. Plus l'indice des protéines est élevé, plus faible a été la dénaturation, ce qui indique un traitement thermique du lait limité rendu possible par sa bonne qualité microbiologique. On distingue ainsi quatre catégories de poudres:

- poudres *low heat* avec WPNI égal ou supérieur à 6. Le traitement thermique du lait est resté faible (pasteurisation à température inférieure à 80 °C). Il s'agit des poudres de la meilleure qualité convenant aussi bien à la préparation du lait de consommation que de celui destiné à la fromagerie;
- poudres *medium heat* avec WPNI compris entre 4,5 et 5,9;

- poudres *medium-high heat* avec WPNI compris entre 4,4 et 1,5;
- poudres *high heat* avec WPNI inférieur à 1,5.

Méthode de fabrication. Après les traitements d'épuration, de standardisation, de pasteurisation ou de préchauffage à haute température, on procède en deux étapes principales: la concentration et le séchage.

Concentration. Comme dans le cas du lait concentré, la concentration se fait par évaporation. L'ébullition se fait sur une surface chaude. Pour des raisons de qualité, on cherche à limiter la température du lait et à réduire son temps de séjour, d'où le traitement sous vide et en film mince.

Pour des raisons énergétiques, on utilise l'effet multiple, la compression mécanique des vapeurs et le préchauffage du liquide. Il est ainsi possible d'évaporer plusieurs kg d'eau avec l'énergie de vaporisation de 1 kg d'eau, alors que le séchage demande l'énergie de plus de 1 kg de vapeur pour sécher 1 kg d'eau. Il y a donc intérêt à concentrer au maximum avant de procéder au séchage.

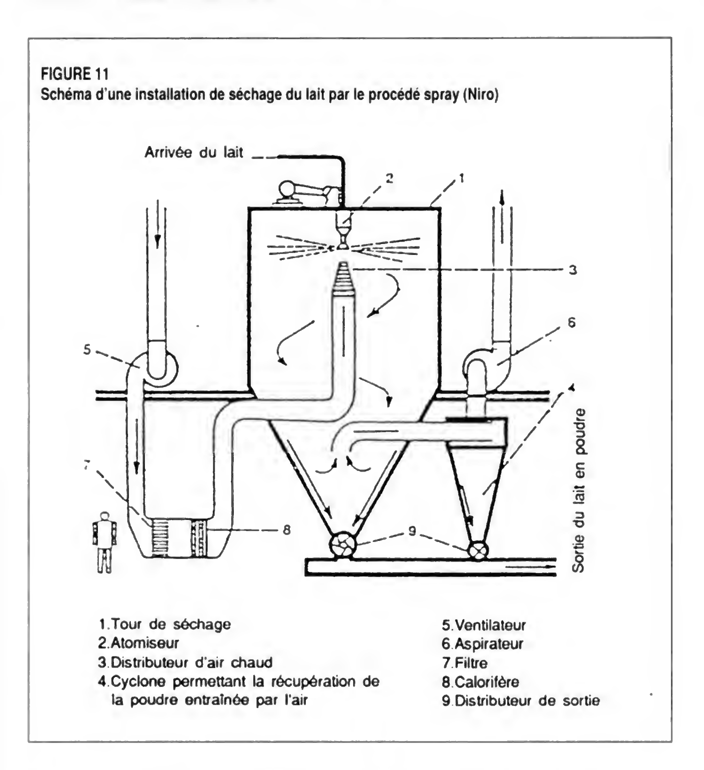
Séchage. Il existe deux procédés principaux: le séchage sur cylindre, ou procédé Hatmaker, et le séchage par pulvérisation.

Dans le procédé Hatmaker, le lait ruisselle à la surface de deux cylindres tournant en sens inverse chauffés intérieurement vers 140 °C à l'aide de vapeur. Il se forme un film de lait qui sèche très rapidement formant une croûte détachée par un racleur. Le chauffage brutal entraîne des modifications de la structure physico-chimique du produit. Les conséquences sont notamment la faible solubilité, le goût de cuit et le brunissement de la poudre. Celle-ci a néanmoins des usages industriels et dans l'alimentation du bétail.

Le procédé par pulvérisation (procédé spray ou par atomisation) (figure 11) est le procédé le plus employé dont il existe diverses variantes. Le lait concentré est finement pulvérisé à l'aide d'une turbine dans un courant d'air chaud (vers 150 °C) à l'intérieur d'une tour de séchage. Le séchage se fait par entraînement, l'air chaud servant de vecteur de chaleur et d'humidité. L'évaporation de l'eau se fait par diffusion instantanée, ce qui provoque le refroidissement (vers 90 °C) de la poudre et de l'air.

Afin d'améliorer l'aptitude des laits en poudre obtenus par pulvérisation

FIGURE 11
Schéma d'une installation de séchage du lait par le procédé spray (Niro)



à la reconstitution en eau chaude ou en eau froide, on fait subir à la poudre un traitement dit d'instantanéisation qui consiste à provoquer la formation d'agglomérats poreux en jouant sur la thermoplasticité des grains de poudre. Ce traitement se fait par humidification de la poudre au moyen d'air humide ou de vapeur. Elle est ensuite séchée, puis les particules sont standardisées selon leur densité. La poudre ainsi obtenue présente des particules dont le diamètre moyen est augmenté (il est supérieur à 100 microns), une densité

réduite d'environ moitié (pour un volume de 100 litres, sa densité en vrac est de 35 à 40 g contre 65 à 75 g primitivement) et une perte d'hygroscopicité.

Reconstitution et recombinaison du lait. On distingue généralement:

- la reconstitution, qui consiste à mélanger de l'eau et du lait en poudre écrémé afin d'obtenir un produit dont la teneur en matière sèche est voisine de celle du lait liquide initial (ou conforme à un rapport eau/matière sèche donné). La reconstitution peut aussi être la dilution d'une poudre de lait grasse dans de l'eau;
- la recombinaison, qui consiste à ajouter à l'eau et à la poudre de lait de la matière grasse laitière anhydre, de façon à obtenir un lait entier ou partiellement écrémé présentant à la fois les rapports eau/matière sèche totale et matière grasse/matière sèche dégraissée conformes au produit désiré.

Bien entendu, ces laits peuvent être mélangés avec du lait frais. Reconstitution et recombinaison sont très largement pratiquées dans les pays à faible production laitière, notamment dans ceux en développement, en vue de préparer des laits de consommation, des laits fermentés, du fromage, de la crème, ou d'autres produits laitiers.

Matières premières. La qualité du lait reconstitué ou recombiné est fonction de celle des matières premières mises en œuvre.

Eau. Elle doit être potable et notamment répondre aux standards fixés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Sur le plan microbiologique, elle ne doit contenir aucun germe pathogène. Leur recherche nécessitant des techniques spéciales, on choisit comme indicateurs de pollution des germes de contamination fécale qui sont plus faciles à identifier, à dénombrer et plus communs (bactéries coliformes, dont *E. coli*, streptocoques fécaux, *Clostridium* sulfitoréducteurs).

Si l'eau n'est pas potable de façon permanente, il est indispensable de la traiter, notamment par la pasteurisation ou la chloration. Sur le plan physico-chimique, elle ne doit contenir ni pesticides, ni nitrates, avoir une dureté totale comprise entre 0 et 15 et un pH voisin de la neutralité.

Lait écrémé en poudre. Il doit être de qualité «consommation humaine» et présenter les spécifications ci-après:

Indice WPNI minimum	4 mg/g
Humidité maximum	4 pour cent
Matière grasse maximum	1,25 pour cent
Acidité titrable maximum (méthode ADMI)	0,10 à 0,15 pour cent
Solubilité maximum (ADMI)	1,25 ml
Impureté (particules brûlées) (ADMI)	disque B ou mieux
Germes aérobies mésophiles à 30 °C maximum dans 1 g	10 000
Bactéries coliformes maximum dans 0,1 g	absence
Levures et moisissures maximum dans 1 g	50

Absence d'odeur et de goût désagréables ou anormaux.

Matières grasses. On utilise généralement de la matière grasse laitière anhydre (MGLA). Elle doit répondre à la composition ci-après:

Matière grasse minimum	99,8 pour cent
Humidité maximum	0,1 pour cent
Acides gras libres maximum (en acide oléique)	0,3 pour cent
Cuivre maximum	0,05 ppm
Fer maximum	0,2 ppm
Indice de peroxyde maximum	0,2
Neutralisants	absence
Bactéries coliformes dans 1 g	absence
Odeur et goût (à 20-25 °C)	doux et francs, sans anomalies.

Méthodes de reconstitution et de recombinaison. Elles sont relativement simples et satisfaisantes dans la mesure où l'on tient compte d'un certain nombre de précautions.

La température de reconstitution varie entre 35 et 45 °C. On verse la poudre dans l'eau contenue dans une cuve ou, mieux, dans un tank tout en agitant assez énergiquement pendant 20 à 30 minutes. Afin de permettre une bonne hydratation de la poudre, il faut maintenir le mélange sous agitation à la température de 5 à 10 °C pendant 5 à 12 heures.

Au cours de l'opération, il est nécessaire d'éviter l'introduction d'air dans le mélange. Il est préférable d'utiliser les dispositifs de mélange comportant

une pompe de recirculation avec apport de la poudre par une trémie située avant la pompe plutôt que ceux comportant la simple agitation mécanique en tank ou en cuve. Un système de filtration ou de nettoyage centrifuge peut être utile pour éliminer les particules résiduelles.

On procède ensuite à la pasteurisation à la température de 74 °C pendant 15 à 20 secondes pour le lait. S'il s'agit de mélanges à teneurs en matières sèches plus élevées, la température doit être augmentée (80-85 °C pendant 20 à 25 secondes). La pasteurisation peut être suivie d'un dégazage permettant l'élimination de saveurs anormales de certaines poudres (saveur de vieux).

Dans le cas de la préparation du lait recombiné l'apport de matière grasse se fait:

- soit directement dans le lait reconstitué (écrémé) après fluidification de la MGLA par réchauffage vers 38-42 °C. Le mélange est ensuite agité à la température de 55 à 65 °C puis homogénéisé sous une pression d'environ 250 bars;
- soit sous forme d'une crème à 20-30 pour cent de matière grasse obtenue par mélange de lait écrémé et de MGLA chauffé à 55-65 °C et homogénéisée dans un appareil à deux étages, le premier opérant à 200 bars environ et le second à 50 bars. Cette crème est ensuite mélangée énergiquement avec le lait reconstitué écrémé préalablement préparé.

Ces laits sont ensuite pasteurisés ou éventuellement stérilisés. Au cours de la reconstitution du lait, il est indispensable d'éviter la dissémination des poudres dans la salle de traitement et d'y maintenir d'excellentes conditions d'hygiène.

Laits spéciaux

Laits infantiles. C'est par touches successives que l'on a cherché à rapprocher la composition du lait de vache de celle du lait de femme. On a commencé par corriger les écarts les plus importants et les plus faciles à identifier. On y parvenait par dilution du lait aux deux tiers environ avec de l'eau et par sucrage par apport de 5 pour cent de saccharose ou par apport de malto-dextrines, voire en ajoutant un peu de crème. Pour pallier la difficulté de digestion des matières grasses chez le nourrisson (de 2 à 3

mois), on produit du lait partiellement écrémé dès lors présentant un déséquilibre calorique. Se rendant compte aussi que la caséine du lait de vache coagulait dans l'estomac sous forme de gros caillots, on a procédé à sa précipitation préalable sous forme fine à l'aide d'une acidification contrôlée par ajout d'acide lactique ou par culture de ferment lactique. L'apport de jus de citron et de farines donne aussi des résultats.

L'effort de préparation des laits se rapprochant le plus possible du lait de femme pris comme modèle se poursuit grâce à une connaissance toujours accrue de la composition et de la structure physico-chimique des laits et grâce à des études cliniques plus fines. Ainsi, on a constaté la nécessité d'enrichir le lait en acides gras insaturés, notamment en acide oléique. Cet apport se fait facilement à l'aide de graisses végétales (maïs, tournesol, etc.). On peut même affiner davantage la composition lipidique par l'apport de mélanges de graisses ou de certaines fractions d'entre elles. Toutefois, ces graisses végétales réduisent la teneur du lait en cholestérol et en d'autres constituants mineurs.

Le lait de vache a une teneur excessive en protéines, notamment en caséine, et insuffisante en azote non protéique. En outre, il contient moins de cystine que celui de femme, mais davantage de lysine, de méthionine, de phénylalanine et de tyrosine. De plus, les séquences d'acides aminés sont différentes. Des écarts très importants apparaissent aussi dans les teneurs en protéines solubles: l'α-lactalbumine est présente à raison respectivement de 1,5 g/litre et de 2,6 g/litre dans le lait de vache et le lait de femme, la ß-lactoglobuline est présente dans le lait de vache (2,7 g/litre) et absente dans le lait de femme. Il en est de même pour d'autres petits constituants dont l'intérêt biologique ne saurait être négligé: immunoglobulines, nucléotides, etc.

La complexité de la composition protidique du lait de femme rend très difficile sa reconstitution à partir de celui de vache (ou d'autres espèces). Le problème des glucides est apparemment plus aisé, encore que 15 pour cent environ des sucres du lait de femme soient constitués d'oligosides complexes alors que le lait de vache contient seulement du lactose. Le «rééquilibrage» se fait par l'apport de saccharose ou de malto-dextrines.

Les sels minéraux du lait de vache sont en quantités de trois à cinq fois

supérieures à ceux du lait de femme. Diverses techniques permettent de rétablir une composition normale. En ce qui concerne les vitamines, il y a quelques différences entre les laits, mais il est assez facile de les corriger si nécessaire.

Les divers constituants du lait infantile, qu'ils soient d'origine laitière ou non, sont mélangés en proportion voulue en phase liquide (eau, lait, lactosérum, crème) puis homogénéisés. Le produit est ensuite séché comme le lait en poudre par le procédé spray ou par d'autres techniques (séchage sur plateau, etc.).

Laits de régime et laits médicamenteux. Ce sont des produits destinés à l'alimentation de nourrissons, enfants ou adultes atteints de troubles métaboliques et nutritionnels. Il en existe un très grand nombre faits à base de lait de vache auquel on a fait subir certaines modifications. Celles-ci portent notamment sur les fractions protidiques, les éléments minéraux et le sucre de lait.

Dans le cas d'intolérances graves des protéines de lait de vache chez les nourrissons, on remplace celles-ci par des protéines végétales (par exemple, soja). On peut aussi soumettre à une hydrolyse enzymatique les protéines ou seulement les protéines de lactosérum, afin qu'il ne reste plus de protéines intactes. Dans le cas d'intolérance spécifique à un acide aminé, on prépare un lait dépourvu de celui-ci.

Dans les régimes hyposodés, on réduit la teneur du lait en sodium avec généralement augmentation de celle en potassium. On connaît aussi les laits sans calcium utilisés dans le cas d'hypercalcémie.

En cas d'intolérance au lactose, on propose des laits sans lactose et autres dérivés (galactose). Il existe aussi des laits dont le lactose a été hydrolysé par voie enzymatique. On peut citer aussi les laits de composition lipidique remaniée employés chez des individus atteints de diarrhée.

Laits vitaminés. Certains laits en poudre (ou liquides) sont enrichis en vitamines, notamment A et D3, généralement après pasteurisation et dans certaines limites. Cette supplémentation doit être soigneusement contrôlée

de façon à éviter une hypervitaminose ou, au contraire, une inutilité du traitement.

Depuis 1984, le lait écrémé en poudre livré par le Programme alimentaire mondial (PAM) et distribué en l'état aux populations bénéficiaires est de règle enrichi en vitamine A (cette décision a été prise avec l'aval de l'OMS). Par contre, il ne l'est pas dans des projets comme ceux de reconstitution du lait ou de transformation industrielle du lait en fromage ou en yaourt, opération au cours de laquelle la vitamine risque d'être détruite.

VALEUR NUTRITIVE DES LAITS DE CONSOMMATION

Les traitements technologiques peuvent modifier la composition du lait et, ce faisant, sa valeur nutritive. Certains changements sont par nature évidents: l'écrémage prive le lait de sa matière grasse et des acides gras essentiels et entraîne des pertes élevées en vitamines liposolubles A et E. La perte est partielle dans le lait demi-écrémé. D'autres techniques ont des effets plus insidieux, comme le chauffage ou la conservation (Hermier et Cerf, 1987).

En fait, il est difficile de prévoir la teneur en nutriments de laits obtenus par une combinaison de divers procédés technologiques, ainsi que le montre la composition vitaminique de différents types de lait (tableau 47).

Effets des traitements thermiques

Les effets de la température de chauffage multiplient en proportion ceux de la durée et sont visibles surtout sur le constituant protéique du lait, mais peu sur la matière grasse (figure 12).

Dénaturation de la matière azotée

Effets des procédés technologiques. La chaleur modifie la configuration spatiale des protéines, sans léser la séquence polypeptidique (structure primaire). Cette dénaturation débute à des températures de 80 °C, et est partiellement réversible.

La caséine résiste aux effets thermiques: elle coagule seulement après un chauffage d'une heure à 125 °C. Des chauffages moins intenses et couram-

TABLEAU 47

Teneurs en vitamines de différents types de lait (par litre)

Vitamines	Lait pasteurisé			Lait UHT			Lait stérilisé	
	Entier	Demi-écrémé	Ecrémé	Entier	Demi-écrémé	Ecrémé	Entier	Demi-écrémé
A *(mg)*	0,55	0,25	Traces	0,55	0,25	Traces	0,55	Traces
D *(µg)*	0,30	0,01	Traces	0,30	0,10	Traces	0,30	Traces
C *(mg)*	8	8	8	1	1	1	0,8	0,8
B_1 *(mg)*	0,40	0,35	0,40	0,1	0,39	0,40	0,30	0,31
B_2 *(mg)*	1,67	1,83	1,83	1,83	1,85	1,77	1,48	1,48
B_6 *(mg)*	0,60	0,61	0,65	0,44	0,49	0,47	0,39	0,41
B_{12} *(µg)*	3,60	3,90	3,80	2	2	2,3	1	0,90
Acide pento-thénique *(mg)*	3,60	3,14	3,20	3,26	3,38	3,28	2,94	3,33
Acide nicoti-nique *(mg)*	0,83	0,89	0,89	0,91	0,97	0,98	0,95	1,2
Biotine *(mg)*	20	21	23	19	19	17	19	21
Folates *(µg)*	57	58	53	8	19	12	2	3

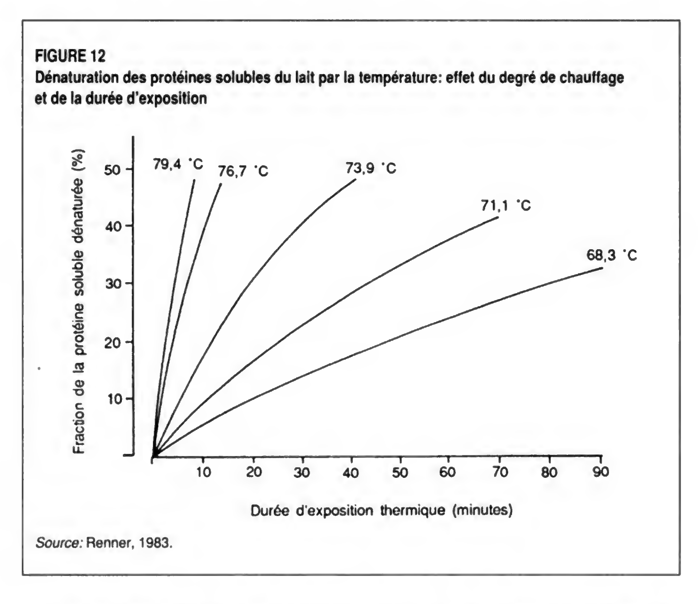
Source: Renner, 1989.

ment pratiqués peuvent ouvrir et littéralement déplier l'arrangement spatial des chaînes peptidiques.

Les protéines solubles sont très altérées par la chaleur (figures 12 et 13 et tableau 48). La pasteurisation dénature de 10 à 20 pour cent des protéines du lactosérum, le processus UHT direct de 40 à 60 pour cent et le processus indirect de 60 à 80 pour cent. Enfin, la stérilisation classique les dénature, mais pas totalement. La sensibilité à la chaleur va décroissant, des immunoglobulines (extrêment altérables) aux sérum-albumine et ß-lactoglobuline, puis à l'α-lactalbumine (la protéine sérique la plus stable). Le degré de dénaturation de la lactoferrine varie avec son taux de saturation en fer. La fraction protéose-peptone résiste très fortement à la chaleur.

La qualité des protéines sériques varie donc en fonction du traitement thermique subi, et les laits pasteurisés, UHT et stérilisés ne sont pas équivalents à cet égard.

FIGURE 12
Dénaturation des protéines solubles du lait par la température: effet du degré de chauffage et de la durée d'exposition



Source: Renner, 1983.

Nature des modifications biochimiques. A des températures supérieures à 75 °C, les acides aminés soufrés libèrent des groupements sulfhydryl volatiles qui donnent au lait chauffé son goût cuit très caractéristique, en quantités dépendant de l'intensité du chauffage (elles sont déjà maximales à 90 °C).

A température plus élevée (lait stérilisé), les quantités de ces groupements diminuent. Dans certains laits, de la cystine est ajoutée pour améliorer leur qualité nutritionnelle, notamment dans les laits destinés aux nourrissons. D'autre part, les pertes en composés thermosensibles (acides aminés branchés et histidine) méritent aussi d'être surveillées après un chauffage intense.

Les produits laitiers et les aliments lactés pour nourrissons ne contiennent pas de complexes lysine-alanine. La présence de ce composé est un

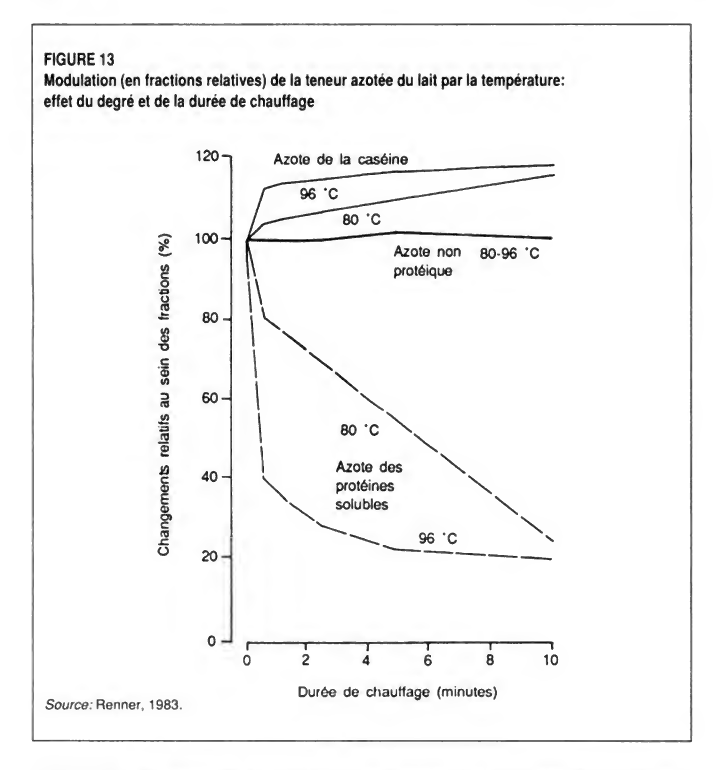


FIGURE 13
Modulation (en fractions relatives) de la teneur azotée du lait par la température: effet du degré et de la durée de chauffage

Source: Renner, 1983.

indicateur de dénaturation protéique, également corrélé à la perte de cystine et de sérine.

Interactions entre protéines suite au chauffage. Les réactions de dénaturation protéique du lait peuvent être caractérisées comme suit: les protéines s'agrègent soit en formant entre elles des ponts disulfites, soit en reliant entre elles les micelles de caséine par l'entremise des protéines solubles dénaturées.

TABLEAU 48

Dénaturation complète par la chaleur des diverses fractions protéiques du lait de vache

Protéines	Dénaturation	
	Température (°C)	Durée
Immunoglobulines	74	15 secondes
Sérum-albumine	84	15 secondes
β-lactoglobuline	86	15 secondes
α-lactalbumine	100	5 minutes
Caséine	125	>60 minutes

Lorsque la caséine précipite, elle entraîne la fraction des protéines solubles complexées. Cette coprécipitation entraîne non plus seulement 80 pour cent de l'azote protéique total, mais plus de 95 pour cent de la fraction azotée protéique du lactosérum, tandis que la teneur de la phase soluble en azote non protéique (NPN) demeure inchangée. La coprécipitation par la chaleur est avantageuse en fromagerie, puisqu'elle augmente les rendements en favorisant l'incorporation des protéines solubles dénaturées au coagulum constitué par les caséines.

Les laits de chèvre et de brebis présentent des courbes de stabilité à la chaleur semblables à celles du lait de vache. Dans le cas du lait de chèvre, une variation individuelle considérable du temps de coagulation par la chaleur a été démontrée.

Conséquences nutritionnelles du chauffage des protéines. La digestibilité des protéines dénaturées à la chaleur est supérieure à celle des protéines natives. Les protéines chauffées précipitent dans le milieu acide de l'estomac en particules plus fines et donc plus dispersées. Elles sont ainsi plus accessibles aux enzymes hydrolytiques qui agissent plus facilement sur une protéine ouverte. Le meilleur coefficient d'utilisation digestive des laits pasteurisés et UHT comparés au lait cru est le témoin de cette différence. Le traitement à la chaleur permettrait aussi de neutraliser certains inhibiteurs naturels du lait, des anti-trypsines notamment.

Interactions du composant glucidique

Réaction de Maillard. A haute température et/ou lors de très longues périodes de stockage, il apparaît dans le lait des aldéhydes, des cétones et des substances réductrices. Elles interagissent avec certains acides aminés, amines et protéines. Cette réaction (dite de Maillard) intervient principalement entre le lactose et la ß-lactoglobuline, mais aussi avec les caséines. Les produits de Maillard peuvent prendre une teinte brune (surtout dans les laits stérilisés et évaporés). L'un de ces produits qui sert d'indicateur est le hydroxyméthylfurfural. Ce composé n'existe pas dans le lait cru et sa teneur augmente du lait pasteurisé au lait UHT direct et indirect pour être encore plus élevée dans le lait stérilisé. Les produits de la réaction de Maillard donnent au lait une odeur et une saveur agréables.

Les aldéhydes et certains sous-produits présentent une forte affinité pour la lysine et forment, lors de la réaction, des dérivés résistant à l'hydrolyse enzymatique. La lysine piégée dans ces composés n'est plus biodisponible. On peut estimer la «perte» de lysine à 1-2 pour cent dans le lait pasteurisé, à 2-4 pour cent dans le lait UHT, à 5 pour cent dans le lait bouilli, à 5-10 pour cent dans le lait stérilisé et à 20 pour cent dans le lait évaporé. Cette réaction se poursuit au cours du stockage du lait et son intensité dépend fortement du degré d'humidité du milieu de conservation, mais aussi de la forme physique du lactose.

En raison de la teneur initiale élevée en lysine, la perte peut être considérée comme négligeable au cours du processus industriel classique (Adrian et Lepen, 1987), et donc les répercussions nutritionnelles pour l'adulte sont le plus souvent faibles. Par contre, chez le nourrisson recevant une alimentation essentiellement lactée, ces modifications doivent être prises en considération (tableau 49).

La plupart des auteurs estiment les produits de la réaction de Maillard inoffensifs pour le fœtus et le nouveau-né, mais certains d'entre eux ont évoqué un risque néphrotoxique.

Complexes avec les minéraux. Le lactose donne des complexes avec certains hydroxyles et notamment avec l'hydroxyde de calcium. La concentration en calcium, mais surtout en lactose, augmente la solubilité de ce complexe qui demeure dispersible en milieu faiblement alcalin. De la même

TABLEAU 49
Effets d'une perte de 40 pour cent de lysine due au traitement thermique sur la quantité de protéines fournies au nourrisson

Laits	Teneur initiale en protéines *(g/litre)*	Perte de lysine *(g/litre)*	Teneur en protéines utilisables *(g/litre)*
Lait maternel	12	–	12
Lait demi-écrémé acidifié	30	12	18
Lait demi-écrémé doux	26	11	15
Lait adapté de 1er âge	16	6,4	9,6

Source: Adrian et Lepen, 1987.

manière, l'absorption intestinale (passive) du magnésium, du zinc, du fer réduit et du manganèse se trouve renforcée. Ces propriétés du lactose sur la biodisponibilité des minéraux s'estompent lorsque le chauffage du lactose est poussé fort loin.

Impact sur les constituants lipidiques. Le chauffage ne semble pas modifier la qualité des graisses quand la technique appliquée au lait est la pasteurisation courte, instantanée, la stérilisation ou le processus UHT. Lors du chauffage du lait, les acides cétoniques et hydroxylés naturels sont convertis respectivement en méthyl-cétones et en lactones, qui modifient les propriétés organoleptiques du lait. Tous les laits chauffés contiennent de tels dérivés carboxydes, mais à des degrés divers et parfois en quantités insuffisantes pour altérer sensiblement le goût et l'arôme, le lait UHT en contenant plus qu'un lait pasteurisé.

La pasteurisation n'altère pas les graisses polyinsaturées et donc les acides gras essentiels; l'acide linoléique est stable à haute température et sa décomposition ne survient qu'après un chauffage d'une heure à 180 °C. Par contre, les laits stérilisés et UHT subiraient au cours du traitement thermique une réduction légère de leur teneur en acides gras essentiels.

Impact du traitement thermique sur les minéraux. Le chauffage du lait

TABLEAU 50

Effets de divers traitements thermiques sur la perte vitaminique

Procédés	Pertes (%)				
	Thiamine	Pyridoxine	Cobalamine	Acide folique	Acide ascorbique
Pasteurisation	10	0-8	10	10	10-25
UHT	0-20	10	5-20	5-20	5-30
Ebullition	10-20	10	20	15	15-30
Stérilisation	20-50	20-50	20-100	30-50	3-100

Source: Renner, 1989.

diminue la fraction de calcium et de phosphore solubles, mais a des conséquences limitées pour l'être humain en raison des quantités initiales très élevées de ces minéraux. Le fluor ionisé diminue également sous l'effet de la chaleur.

Effet de la chaleur sur les vitamines. Seuls la thiamine, la cyanocobalamine et l'acide ascorbique sont réellement très thermosensibles. La pyridoxine et les folates subissent aussi l'effet de la chaleur (tableau 50). Les autres vitamines sont peu ou ne sont même pas détruites lorsque l'exposition à la chaleur survient à l'abri de l'air (oxygène) et de la lumière.

Les techniques actuelles de pasteurisation et UHT ne modifient que peu la teneur vitaminique du lait (<20 pour cent), pour autant que les procédés soient correctement appliqués (sans exposition prolongée à haute température). Le même principe vaut lors du processus de séchage par pulvérisation.

Les techniques anciennes (stérilisation en bouteille ou concentration sans addition de sucre) et le séchage sur cylindre entraînent des pertes considérables de folates, de thiamine et de vitamine B_{12} ainsi qu'une non-biodisponibilité de la vitamine B_6. L'ébullition domestique (souvent à haute température et prolongée) diminue fortement la valeur vitaminique du lait (tableau 50). Cette baisse de valeur nutritive est d'autant plus importante que le lait (écrémé) est mal conservé. La destruction des vitamines se poursuit lors du stockage, surtout en ambiance humide.

La perte de vitamine C est plus imputable à l'oxydation qu'à l'exposition à la chaleur. La forme dé-hydroascorbique est nettement plus sensible à la chaleur que l'acide ascorbique lui-même. La destruction des vitamines peut être réduite par dégazage du lait, c'est-à-dire en diminuant fortement la teneur en oxygène ambiant.

Effet du traitement thermique sur les enzymes. Les enzymes endogènes (phosphatases alcalines, peroxydase) sont très thermosensibles. Leur disparition sert d'indice d'efficacité de la méthode thermique appliquée: la xanthine-oxydase n'est détruite qu'à des températures supérieures à 85 °C et les phosphatases acides supportent la pasteurisation, mais pas le traitement UHT (figure 14). En établissant le profil enzymatique d'un lait, on peut ainsi établir le traitement qu'il a subi et donc son origine.

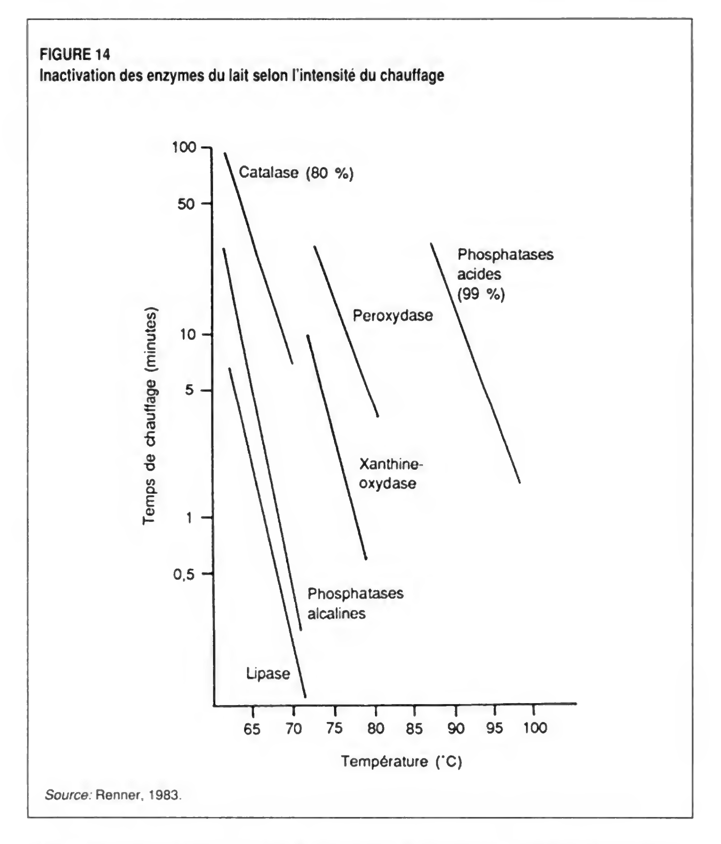
Les souches de *Pseudomonas* psychrotrophe produisent des lipases et des protéases thermostables. Le chauffage long à des températures élevées nécessaire à la destruction de ces enzymes exogènes, abîme aussi le lait. Leur persistance favorise l'apparition dans le lait (UHT) d'acides gras, cause d'acidité et de rancissement.

Un chauffage préalable et modéré du lait (1 heure à 55 °C pour les protéinases, 10 secondes à 74 °C pour les lipases) permet de se débarasser, en partie au moins, de ces enzymes gênantes.

Chauffage des laits destinés à l'alimentation infantile. Des nourrissons alimentés au lait humain, cru, pasteurisé ou bouilli ne se développent pas de la même façon. Les rétentions azotée, calcique, phosphorée et sodique sont comparables, mais les prises pondérales diffèrent: le gain de poids d'un nouveau-né recevant du lait de femme chauffé est d'un tiers plus bas en raison notamment de l'inactivation par la chaleur des lipases naturelles du lait humain. D'autres modifications entrent très vraisemblablement en ligne de compte (voir chapitre 1).

Les aliments lactés pour nourrissons sont fabriqués avec du lait de vache qui a été au préalable chauffé. De tous les traitements thermiques, c'est le processus UHT qui abîme le moins le lait tout en lui conférant des propriétés alimentaires et nutritives satisfaisantes et des qualités d'hygiène suffisantes.

FIGURE 14
Inactivation des enzymes du lait selon l'intensité du chauffage



Source: Renner, 1983.

La stérilisation est à ce dernier égard supérieure, mais détériore trop les caractéristiques nutritionnelles de la matière première. En conséquence, un lait stérilisé ne devrait pas être utilisé pour préparer des produits diététiques spécialement destinés aux nourrissons (tableau 51).

TABLEAU 51
Effets de divers traitements thermiques sur la qualité du lait

Procédés	Effets sur la qualité du lait
Pasteurisation basse et stérilisation UHT	Pas de modification nutritionnelle ou organoleptique
Stérilisation classique	Apparition du goût cuit Brunissement du lait Pertes notables de thiamine Pertes élevées de vitamine B_{12}
Ebullition domestique	Destruction de la vitamine C Diminution de la digestibilité (modification des protéines solubles)
Pasteurisation haute, non à l'abri de l'air	Altération de l'équilibre minéral Dégagement de CO_2

Homogénéisation

L'homogénéisation a pour but de réduire la dimension des globules gras de 3 à 6 µm à 1 µm environ et d'augmenter les surfaces d'échange avec le milieu environnant. Elle provoque la formation de complexes lipides-protéines.

Ces modifications présentent un intérêt nutritionnel: les globules gras offrent davantage de sites à l'action des lipases et la digestion est facilitée, notamment chez le nourrisson prématuré. La digestion protéique est aussi améliorée: l'acidification gastrique permet d'obtenir un caillé plus doux et plus finement dispersé.

Condensation

L'évaporation se faisant sous basse pression, des températures peu élevées (55-65 °C) c'est-à-dire moins délétères pour le composant nutritionnel, suffisent à réduire l'eau du lait.

Le préchauffage (100-120 °C pendant 1 à 3 minutes) stabilise les protéines et l'homogénéisation disperse les globules gras, empêchant la coagulation des premières et la coalescence des seconds lors de la stérilisation ultérieure éventuelle.

La fabrication du lait concentré sucré n'exige justement pas le passage par une stérilisation puisque le sucre ajouté sert de conservant. De ce fait, les détériorations d'ordre nutritionnel sont évitées. Par contre, le procédé

TABLEAU 52
Teneurs en minéraux des laits concentrés comparées au lait entier pasteurisé (mg/100 g)

Minéraux	Lait entier			Lait écrémé seché
	Pasteurisé	Evaporé	Condensé	
Calcium	110	292	286	1 280
Magnésium	11	31	29	127
Sodium	58	188	132	555
Potassium	126	354	389	1 588
Phosphore	90	253	233	968
Fer	0,04	0,26	0,23	0,27
Zinc	0,36	0,95	1,03	0,27
Cuivre	<0,01	0,02	<0,01	<0,01

implique un bon contrôle de la cristallisation du lactose (procédé de refroidissement après évaporation) qui favorise, en présence d'eau, la réaction de Maillard (voir plus haut). La réaction du blocage de la lysine dépend donc moins du degré d'humidité d'une poudre que de l'état physique du lactose. La fabrication du lait condensé non sucré additionne les risques nutritionnels de la condensation et de la stérilisation qui reste nécessaire.

La valeur biologique des protéines des laits condensés est finalement peu altérée et la composition aminée proche de celle du lait initial; la teneur en lysine est néammoins réduite de 20 pour cent environ. Le tableau 52 donne la teneur des principaux minéraux; leur biodisponibilité n'est pas altérée par la condensation.

Les quantités vitaminiques sont dans l'ensemble très proches des valeurs initiales: seuls la thiamine, la pyridoxine, les folates et la vitamine B_{12} voient respectivement leurs taux réduits à 65, 48, 77 et 17 pour cent dans le lait entier condensé. Dans le lait entier concentré sucré, seule la pyridoxine est réduite à 45 pour cent de sa quantité initiale, parce que ce lait échappe à la stérilisation (tableau 53).

TABLEAU 53

Teneurs en vitamines des laits concentrés comparées au lait entier pasteurisé (par kg de produit)

Vitamines	Lait entier			Lait écrémé séché
	Pasteurisé	Evaporé	Condensé	
A *(mg)*	0,55	1,08	1,11	4,04 (S)
D *(µg)*	0,30	40 (S)	54 (S)	21 (S)
C *(mg)*	8	15	41	132
B_1 *(mg)*	0,40	0,65	0,85	3,80
B_2 *(mg)*	1,67	4,20	4,60	16,30
B_6 *(mg)*	0,60	0,72	0,68	6
B_{12} *(µg)*	3,60	1,40	7,30	26
Acide pantothénique *(mg)*	3,8	7,50	8,50	33,3
Acide nicotinique *(mg)*	0,83	2,40	2,90	10,2
Biotine *(µg)*	20	40	39	200
Folates *(µg)*	57	110	150	510
E *(mg)*	0,9	2	2	2

Note: (S) = supplémenté.

Dessiccation (séchage)

Les modifications nutritionnelles consécutives à ce procédé sont celles du traitement thermique: le séchage sur cylindre est donc plus «agressif» que le séchage par pulvérisation. Le premier procédé provoque presque immanquablement une dénaturation des protéines solubles et un brunissement. Avec du lait entier, les globules gras s'agrègent. Le second procédé ne permet pas d'éviter la coalescence partielle des particules lipidiques. Au cours de l'évaporation, les globules gras se divisent et se couvrent de micelles de caséine et de protéines sériques. Le taux de lysine diminue environ de 5 pour cent ou de 15 pour cent lors de la pulvérisation ou du passage sur cylindre, respectivement. Une perte de certains autres acides aminés peut survenir. On considère, cependant, que la valeur biologique des protéines du lait en poudre est proche de celle du lait initial pour peu qu'il n'y ait pas eu de chauffage intense. Par contre, le lait dont le lactose a été

TABLEAU 54

Biodisponibilité de la lysine après 20 mois de conservation de poudre de lait à des humidités relatives différentes

	Humidité relative de conservation				
	Fraîche (>80%)	31%	37%	42%	56%
Humidité de la poudre (eau en g pour 100 g de poudre)	2,6	5,0	4,95	5,3	6,4
Forme physique cristallisée du lactose	A	A	A	C	C
Biodisponibilité de la lysine *(%)*	100	92,4	91,5	84,4	68,1

Source: Adrian et Lepen, 1987.

hydrolysé avant séchage possède une valeur biologique moindre (taux réduit de lysine), le blocage de la lysine par les monosaccharides (glucose) étant intense. La dessiccation par pulvérisation ne semble pas modifier les taux de vitamines, alors que le passage sur cylindre est moins inoffensif.

Stockage

Effet de l'humidité. Les laits en poudre y sont particulièrement vulnérables, car au cours de la conservation le lactose amorphe, très hygroscopique, fixe progressivement de l'eau, ce qui provoque sa cristallisation sous forme monohydratée. Cette cristallisation se produit de manière intense lorsque l'humidité relative dans la poudre atteint ou dépasse 40 pour cent (soit une teneur absolue en eau de l'ordre de 5 g/100 g de poudre). Les conséquences nutritionnelles de cette humidification de la poudre sont importantes, car l'eau absorbée sur le lactose amorphe excède la quantité nécessaire à la cristallisation. Lorsque celle-ci se produit, il apparaît dans le milieu une eau métaboliquement très active qui déclenche notamment la réaction de Maillard. Il en résulte que la réaction de blocage de la lysine est à la fois tributaire du degré d'humidité et de l'état physique du lactose (tableau 54).

A 37 °C et un degré d'humidité de 4 pour cent, la teneur des vitamines décroît aussi progressivement. Après 30 jours, les folates ont baissé de 72 pour cent, l'ascorbate de 91 pour cent; après 60 jours, la vitamine B_1 n'a

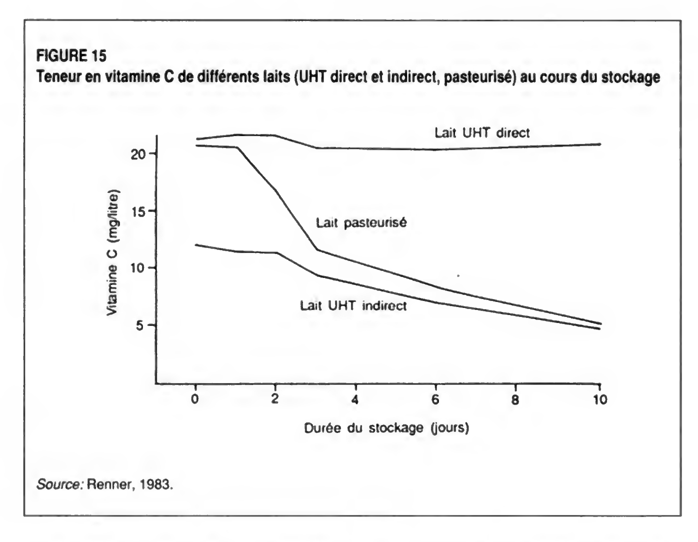


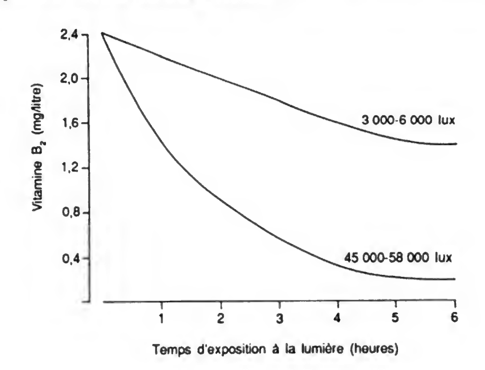
FIGURE 15
Teneur en vitamine C de différents laits (UHT direct et indirect, pasteurisé) au cours du stockage

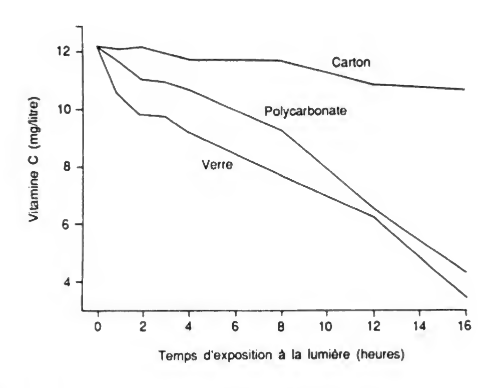
Source: Renner, 1983.

plus que 12 pour cent de sa teneur initiale. Lorsque le degré d'humidité atteint 10 pour cent, après 15 jours, les folates et la vitamine C ne sont plus dosables alors que la thiamine maintient 40 pour cent de son taux initial après un mois dans ces conditions.

Effet de l'oxygène. Les folates et la vitamine C sont particulièrement oxygéno-sensibles (figure 15); les vitamines B_{12}, A, E et la choline le sont moins; les vitamines B_1, B_6 et D le sont modérément; les autres ne le sont pas. En réfrigérateur, des pertes vitaminiques ont lieu également, mais à vitesse réduite. Une conservation en emballage imperméable à l'(oxygène de l') air est donc recommandée après dégazage pour éliminer l'air et son oxygène (poudre désaérée). Le type d'emballage choisi joue à cet égard aussi un rôle qu'il convient de garder à l'esprit (figure 16). Dans les laits entiers en poudre, c'est l'oxydation des graisses au cours de la conservation qui est susceptible d'induire une odeur et un goût désagréable du produit.

FIGURE 16
Influence de l'exposition lumineuse sur la teneur vitaminique du lait: effet de l'intensité (vitamine B_2) et de la nature de l'emballage (vitamine C)





Source: Renner, 1983.

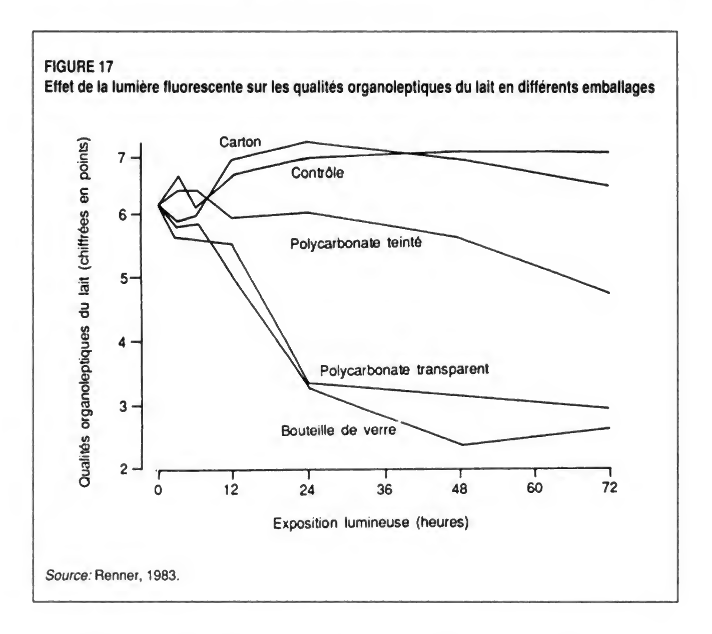


FIGURE 17
Effet de la lumière fluorescente sur les qualités organoleptiques du lait en différents emballages

Source: Renner, 1983.

Conséquences des rayonnements. La lumière solaire et le rayonnement UV provoquent la destruction partielle ou totale des vitamines A, B_2, B_6 et C. Les taux de riboflavine et d'acide folique diminuent de 10 à 30 pour cent par heure d'exposition au soleil (figure 16). Les radiations ionisantes, capables d'assainir le lait, ont des effets similaires, mais induisent de plus des saveurs désagréables: celles-ci sont dues à l'oxydation des matières grasses (figure 17). La présence d'oxygène ambiant accélère certaines réactions, comme la destruction de l'acide ascorbique. Les autres substances, notamment vitaminiques, ne sont pas sensibles aux rayonnements. Leurs effets sont cependant suffisamment importants pour qu'on recommande de conditionner et de conserver le lait en récipients opaques (feuille d'aluminium) ou en

verre teinté. Le rayonnement UV offre la propriété intéressante de transformer certains stérols du lait en vitamine D_3. Le phénomène est difficile à contrôler et son application n'est pas autorisée dans tous les pays.

Impact nutritionnel de la conservation chimique. La conservation du lait en présence d'eau oxygénée est interdite dans la plupart des pays, mais autorisée dans certaines régions tropicales. Une addition de 0,5 à 0,8 pour cent d'H_2O_2 préserve le lait des développements bactériens, notamment coliformes. De la catalase ajoutée ensuite au milieu permet d'éliminer l'eau oxygénée. Le lait ainsi traité conserve ses qualités nutritionnelles, mais subit une dénaturation de ses protéines solubles. La méthionine et la cystine sont partiellement oxydées, mais les métabolites obtenus semblent biologiquement utilisables et interchangeables. Les vitamines B_1, B_6, C et la niacine sont faiblement oxydées.

Chapitre 5

Laits fermentés

INTRODUCTION

On rassemble sous ce terme différents produits obtenus par fermentation du lait par des bactéries lactiques et éventuellement d'autres micro-organismes, notamment des levures. Ils se différencient des fromages frais obtenus par coagulation lactique par l'absence d'égouttage du gel.

La fermentation modifie les composants du lait et les caractères organoleptiques de celui-ci. Certaines de ces transformations sont communes aux divers laits fermentés; c'est le cas de l'acidification et de la gélification. D'autres sont spécifiques de chaque type de lait fermenté, comme la formation de composés aromatiques, de gaz, d'éthanol et l'hydrolyse des protéines.

Les laits fermentés se différencient les uns des autres par:

- leur état final: coagulum (ou gel) plus ou moins ferme; crème plus ou moins visqueuse, liquide. Le produit peut aussi être mousseux;
- l'origine du lait: celui-ci peut provenir d'une seule espèce (vache, bufflonne, chèvre, brebis, jument, chamelle, yack, etc.) ou de plusieurs;
- la composition du lait en matière grasse et en matière sèche; il peut être:
  - plus ou moins écrémé ou enrichi en matière grasse,
  - utilisé en l'état ou dilué ou concentré par différents procédés (chauffage à feu nu ou en vacuum, ultrafiltration, addition de lait en poudre ou de concentrés protéiques pulvérulents tels que caséine ou caséinates);
- les caractères de la flore lactique et de la flore éventuelle d'accompagnement;
- la température d'incubation;
- les traitements technologiques;

- les éventuels additifs: sucre, fruits, confitures, arômes naturels, colorants, etc.

Les laits fermentés sont préparés depuis une époque très lointaine en Asie centrale, dans les pays méditerranéens et dans la plupart des régions d'élevage où ils constituent un mode de protection et de conservation du lait grâce à l'abaissement du pH en même temps qu'ils sont un aliment apprécié pour sa saveur. Longtemps restés traditionnels, certains de ces produits connaissent depuis quelques années un développement considérable grâce, d'une part, à l'intérêt qu'y trouvent les consommateurs sur le plan organoleptique, nutritionnel, voire thérapeutique et, d'autre part, à la mise en œuvre de procédés de fabrication industriels et aux progrès de la distribution. Enfin, l'attrait pour ces produits est renforcé par leur diversification et par de puissantes campagnes publicitaires.

Ces produits présentent un grand intérêt dans les pays en développement en raison de leur acidité qui en fait des aliments hygiéniques, sans inconvénients pour les consommateurs intolérants au lactose. De plus, ils présentent une bonne valeur nutritionnelle, des qualités organoleptiques généralement très bien acceptées ainsi qu'une relative facilité de préparation et de distribution.

YAOURT

Définition

Le yaourt ou yoghourt est le lait fermenté le plus consommé. Il résulte de la fermentation du lait par deux bactéries lactiques thermophiles: *Streptococcus salivarius*, subsp. *thermophilus* (anciennement dénommé *Str. thermophilus*), et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (anciennement dénommé *L. bulgaricus*).Cette fermentation conduit à la prise en masse du lait. Le coagulum obtenu est ferme, sans exsudation de lactosérum. Il peut être consommé en l'état ou après brassage lui donnant une consistance crémeuse ou liquide. Il peut aussi être congelé et consommé comme une glace.

Le Code des principes FAO/OMS a publié deux normes relatives aux yaourts:

- la norme n° A-11(a) (1975) pour le yaourt et le yaourt sucré;

- la norme nº A-11(b) (1976) pour le yaourt aromatisé et les produits traités thermiquement après fermentation.

Le Codex Alimentarius, norme nº A-11(a) (1975) définit ainsi le yaourt: «Le yaourt est un produit laitier coagulé obtenu par fermentation lactique grâce à l'action de *Lactobacillus bulgaricus* et de *Streptococcus thermophilus* à partir du lait frais ainsi que du lait pasteurisé (ou concentré, partiellement écrémé, enrichi en extrait sec) avec ou sans addition (lait en poudre, poudre de lait écrémé, etc.). Les micro-organismes du produit final doivent être viables et abondants.»

La législation de nombreux pays exige que les bactéries du yaourt soient vivantes dans le produit mis en vente. D'autres pays admettent qu'à la suite d'un traitement thermique destiné à améliorer la durée de conservation, le produit ne contienne plus de bactéries vivantes. Cette pratique n'est pas recommandable, car elle modifie les propriétés du yaourt.

Bactéries et substrat de fermentation

Les deux bactéries associées dans la préparation du yaourt ont pour rôle principal d'abaisser le pH du lait au point isoélectrique de la caséine (pH 4,6) de façon à former un gel (ou coagulum). Outre le goût acidulé qu'elles donnent au gel, elles lui assurent une saveur caractéristique due à la production de composés aromatiques (acétaldéhyde principalement, cétone, acétoïne, diacétyle). Enfin, par la production de polysaccharides (glucanes), certaines souches ont une action dans la consistance du gel.

Lactobacillus delbrueckii, subsp. *bulgaricus*, ne produit que de l'acide lactique au cours de la fermentation du lactose. Il se développe bien à la température de 45 à 50 °C en acidifiant fortement le lait jusqu'à 1,8 pour cent (pH voisin de 4,5), voire, avec certaines souches, jusqu'à 2,7 pour cent d'acide lactique (pH 3,8 à 3,6).

Streptococcus salivarius, subsp. *thermophilus*, se développe bien de 37 à 40 °C, mais croît encore à 50 °C. Thermorésistant, il survit au chauffage à 65 °C pendant 30 minutes ou à 74 °C pendant 15 secondes. Nettement moins acidifiant que le lactobacille, il produit généralement de 0,5 à 0,6 pour cent d'acide lactique (pH voisin de 5,2). Certaines souches sont capables de supporter un pH de 4,3 à 3,8.

Ces deux espèces sont microaérophiles. Elles vivent en symbiose dans le yaourt. Elles produisent davantage d'acide lactique cultivées ensemble que séparément.

Pour se développer, les bactéries ont besoin d'acides aminés et de peptides directement utilisables. Or, le lait n'en contient que de faibles quantités permettant seulement de démarrer leur croissance. Ensuite, le lactobacille, par son activité protéolytique, attaque la caséine qui libère les peptides permettant au streptocoque de poursuivre sa croissance. De son côté, le streptocoque stimule le lactobacille par production d'acide formique. Lorsque l'on ensemence du lait avec les bactéries du yaourt, le pH (6,6-6,8) est favorable au streptocoque qui assure le départ de la fermentation lactique. L'acidité, en se développant, devient défavorable au streptocoque qui est alors relayé par le lactobacille qui poursuit son activité fermentaire jusqu'à un pH d'environ 4,3-4,2.

Le streptocoque produit de l'acide lactique principalement sous la forme L(+), alors que le lactobacille donne surtout la forme D(-). A la fin de la fermentation, le tiers environ du lactose est transformé en acide lactique. Dans la fabrication du yaourt, l'utilisation du lactose se fait selon la voie suivante: une lactase hydrolyse le lactose en ßD-galactose et en D-glucose. Ce dernier est ensuite transformé en acide pyruvique puis en acide lactique pendant que le galactose s'accumule progressivement dans le lait sans être utilisé. Ainsi, dans un lait à 6,5 pour cent (en poids) de lactose, 100 g du yaourt obtenu contiennent environ, après 2 jours de conservation, 4 g de lactose, 0,05 g de glucose, 0,05 g d'oligosaccharide et 1,5 g de galactose.

Composés aromatiques

Divers composés volatiles et aromatiques interviennent dans la saveur et l'appétence du yaourt. C'est principalement le lactose qui joue un rôle dans la formation de ces composés. Parmi ceux-ci, outre l'acide lactique qui confère au yaourt son goût acidulé, c'est l'acétaldéhyde qui joue le rôle principal. Il provient en grande partie de la transformation de la thréonine. Sa concentration optimale est estimée à environ 10 ppm. Sa production est due principalement au lactobacille; elle est augmentée lorsqu'il est en association avec le streptocoque qui en élabore de faibles quantités.

Le diacétyle contribue à donner un goût délicat. Il est dû à la transformation de l'acide citrique et, secondairement, du lactose par certaines souches de streptocoques. D'autres composés (acétone, acétoïne, butane-2-one, etc.) contribuent à l'équilibre et à la finesse de la saveur. Celle-ci résulte d'un choix avisé des souches, de leur capacité à produire dans un juste rapport les composés aromatiques et du maintien de ce rapport au cours de la conservation des levains et de la fabrication.

La saveur caractéristique du yaourt, recherchée dans le produit «nature», est, en partie, masquée dans les yaourts aromatisés, de sorte qu'on lui accorde moins d'importance, ce qui semble être une erreur.

Polysaccharides

La texture et l'onctuosité constituent, pour le consommateur, d'importants éléments d'appréciation de la qualité du yaourt.

Certaines souches bactériennes produisent, à partir du glucose, des polysaccharides qui, en formant des filaments, limitent l'altération du gel par les traitements mécaniques et contribuent à la viscosité du yaourt.

Technologie

Le schéma de la figure 18 résume les étapes de la fabrication du yaourt. Celle-ci peut subir des variantes de sorte que les étapes indiquées peuvent faire l'objet de modifications dans leur ordre comme dans leur nombre.

La figure 18 montre qu'il existe deux types de yaourts:

- le yaourt ferme ou traditionnel, dont la fermentation se fait après conditionnement en pots;
- le yaourt brassé, dont la fermentation se fait en cuve; le coagulum obtenu est alors dilacéré et brassé pour être rendu plus ou moins visqueux, puis conditionné en pots.

La technologie donnée ci-après concerne le lait de vache; elle peut s'appliquer sans difficultés au lait d'autres espèces utilisé seul ou en mélange.

Préparation du lait. La matière première peut être soit du lait frais, soit du lait recombiné (à partir de lait en poudre maigre et de matière grasse laitière

FIGURE 18
Schéma de la fabrication du yaourt

Préparation du lait → Concentration → Traitement thermique → Homogénéisation → Ajustement de la température → Ensemencement

Yaourt ferme	Yaourt brassé
Conditionnement	Fermentation
Fermentation	Brassage
Refroidissement	Refroidissement
Stockage	Conditionnement
Distribution	Stockage
	Distribution

anhydre), soit du lait reconstitué (à partir de lait en poudre maigre), ou encore un mélange. Dans tous les cas, elle doit être de bonne qualité microbiologique, exempte d'antibiotiques ou d'autres inhibiteurs et parfaitement homogénéisée.

La teneur en matière grasse du yaourt est variable. Généralement, elle est ajustée de sorte que le produit entre dans l'une des catégories ci-après:

- yaourt entier: au minimum 3 pour cent (en poids) de matière grasse; en pratique de 3 à 4,5 pour cent;
- yaourt partiellement écrémé: moins de 3 pour cent (en poids) de matière grasse; en pratique: de 1 à 2 pour cent;
- yaourt écrémé: au maximum 0,5 pour cent (en poids) de matière grasse; en pratique de 0,05 à 0,1 pour cent.

Lorsque l'on utilise du lait entier et même du lait partiellement écrémé, il est souhaitable de l'homogénéiser afin d'éviter la remontée de la matière grasse au cours de l'incubation, d'améliorer la consistance du yaourt et de faciliter la digestion de la matière grasse. Dans le cas du lait écrémé, une homogénéisation répétée deux ou trois fois améliore la consistance du yaourt en modifiant la structure des protéines. Il faut cependant observer que, dans certains pays où la fabrication traditionnelle se maintient, on apprécie la présence d'une couche de crème à la surface du produit.

Concentration. La consistance et la viscosité du yaourt sont pour une grande partie sous la dépendance de la matière sèche du lait. La graisse confère de l'onctuosité, masque l'acidité et améliore la saveur. Les protéines améliorent la texture et masquent aussi l'acidité. Selon le Code des principes FAO/OMS, la teneur minimale en matière sèche laitière non grasse est de 8,2 pour cent (en poids) quelle que soit la teneur en matière grasse (norme n°A-11(a), 1975).

En pratique, les teneurs en matière sèche laitière pour le yaourt au lait entier ou partiellement écrémé se situent entre 14 et 16 pour cent (en poids), avec des valeurs extrêmes de 12 à 20 pour cent. Dans le cas du yaourt écrémé, les teneurs en matière sèche sont de l'ordre de 10 à 11 pour cent (en poids).

Traitement thermique. La préparation du lait terminée, celui-ci est soumis sans attendre à un traitement thermique. Il a pour but:

- de détruire les micro-organismes pathogènes pouvant être présents et la plus grande partie de la flore banale. Il permet aussi la suppression éventuelle d'inhibiteurs naturels et la stimulation des bactéries par l'apparition de facteurs de croissance;
- de dénaturer une partie importante des protéines solubles, ce qui a pour conséquence d'augmenter la capacité de rétention d'eau du yaourt et de permettre à ces protéines de se fixer sur la caséine. Ce double phénomène modifie les propriétés rhéologiques du coagulum acidifié: le caillé est plus ferme, la tendance à l'expulsion de sérum au cours du stockage est réduite (notamment quand le produit est conservé à température trop élevée), le yaourt brassé est plus homogène et visqueux.

Il faut dénaturer au moins 80 pour cent des protéines solubles, ce qui permet de multiplier par trois la capacité de rétention d'eau. Ce résultat est obtenu par des combinaisons temps/température appropriées. Dans les petites entreprises où le chauffage est réalisé de façon discontinue en cuves, celui-ci peut se faire pendant 30 minutes à 85 °C ou 10 minutes à 90 ou 92 °C. Dans celles disposant d'une installation de pasteurisation continue, un chauffage de 3 à 5 minutes à 92 ou 95 °C donne généralement satisfaction.

La stérilisation UHT peut remplacer la pasteurisation. Le traitement se fait pendant quelques secondes (de 3 à 4) à 135-140 °C, soit par injection directe de vapeur, soit par chauffage indirect à l'acide d'échangeurs tubulaires ou à plaques. Ce procédé donne un yaourt moins visqueux; on peut y remédier par l'emploi de souches bactériennes fortement productrices de polysaccharides. Toutefois, la structure du produit restant plus fragile, on a intérêt à augmenter la teneur en matière sèche du lait par l'apport de 2 pour cent environ de lait écrémé en poudre.

Lorsque les laits ont été stockés au froid ou/et contiennent des substances à odeurs désagréables, il est recommandé de compléter le traitement thermique par leur désaération.

Homogénéisation. Elle est généralement combinée avec le traitement

thermique. Il s'agit d'une opération complexe dans laquelle le rôle des différents facteurs (matériel, température, pression d'homogénéisation, nature et état du produit) n'est pas clairement expliqué. Pour cette raison, les techniques utilisées sont variées. Certains la pratiquent à la température de 50 à 60 °C avec une pression d'homogénéisation de 150 à 200 atmosphères. Il semble maintenant qu'on préfère des températures de 85 à 90 °C avec des pressions proches de 250 atmosphères.

L'opération peut se faire avant la pasteurisation (ou la stérilisation) proprement dite, dès que la température voulue est atteinte ou après le traitement thermique. Dans ce dernier cas, la consistance du yaourt semble meilleure, mais les risques de recontamination sont à craindre.

Ensemencement. Immédiatement après le traitement chauffage-homogénéisation, le lait est refroidi à la température de fermentation, mis en cuve et ensemencé. L'incubation se fait à l'aide d'un levain comprenant exclusivement une ou plusieurs souches de chacune des bactéries spécifiques du yaourt: *Streptococcus salivarius*, subsp. *thermophilus*, et *Lactobacillus delbrueckii*, subsp. *bulgaricus*.

Dans le cas des petites fabrications traditionnelles familiales ou artisanales, l'ensemencement se fait à l'aide d'un yaourt fait le jour précédent ou acheté dans le commerce à raison d'une cuillerée à soupe par litre de lait. Cette pratique conduit souvent à une fermentation irrégulière et donc à des produits de qualité organoleptique variée, souvent médiocre; en outre, les risques de contamination sont fréquents, voire constants. Habituellement, on utilise une culture fournie par un laboratoire spécialisé sous forme liquide, lyophilisée ou congelée. Le lait, amené à une température généralement voisine de 45 °C (entre 42 et 46 °C), est ensemencé. Une bonne agitation est nécessaire pour rendre parfaitement homogène le mélange lait-ferment. Dans les usines importantes, l'ensemencement se fait en continu. La température optimale de développement du streptocoque est de 42-45 °C; celle du lactobacille de 47-50 °C.

Selon les régions, les consommateurs préfèrent des yaourts plus ou moins acides et plus ou moins aromatiques. Les caractères recherchés dépendent des souches utilisées et de la température d'incubation. En abaissant celle-

ci de 1 à 3 °C (44-42 °C), on favorise le streptocoque et donc la production d'arôme. En l'augmentant légèrement (45-46 °C), on favorise le lactobacille et donc la production d'acide.

On peut aussi obtenir un produit doux et aromatique en utilisant un levain jeune relativement encore peu acide (au début de la phase exponentielle de croissance) dans lequel le streptocoque est en plein développement. Pour obtenir un yaourt acide, on utilise un levain plus âgé dans lequel le lactobacille est dominant du fait de sa résistance à un pH bas. C'est après l'ensemencement que se différencient les procédés de fabrication des yaourts ferme et brassé.

Yaourt ferme (dit aussi en pot, étuvé ou traditionnel)

Le lait ensemencé et à bonne température est rapidement réparti en pots (en verre, en carton paraffiné, en matière plastique) d'une contenance habituelle de 12,5 cl. Dans le cas des yaourts sucrés, aromatisés, aux fruits, à la confiture, etc., l'apport des additifs se fait avant ou après le remplissage des pots.

Après le capsulage (aluminium, carton paraffiné), les pots sont placés dans une étuve (à air chaud) ou parfois au bain-marie pour permettre la fermentation. L'acidification dépend de la température et de la durée d'incubation. La température choisie (entre 42 et 46 °C) est maintenue constante. Il est important qu'elle soit homogène en tous les points de l'étuve de façon à ce que la fermentation soit régulière.

L'incubation dure environ de 2 à 3 heures. Les pots sont maintenus dans l'étuve jusqu'à l'obtention d'une acidité de 0,75 (au minimum) à 1 pour cent environ d'acide lactique, soit 75 à 100º Dornic. A ce moment, le caillé doit être ferme, lisse et sans exsudation de sérum.

Les pots sont alors immédiatement sortis de l'étuve, refroidis le plus rapidement possible à la température de +4 à +5 °C. Ce refroidissement a pour but d'arrêter l'acidification par inhibition des bactéries lactiques. Il se fait en chambre froide bien ventilée ou en tunnel de réfrigération. Les pots sont ensuite stockés à +2-+4 °C pendant 12 à 24 heures de façon à augmenter la consistance sous l'action du froid et de l'hydratation des protéines.

Yaourt brassé

Le lait ensemencé est maintenu en cuve ou en tank à la même température que dans le cas des pots (entre 42 et 46 °C) jusqu'à obtention de l'acidité voulue. Celle-ci est souvent un peu plus élevée que pour le yaourt ferme: de 1 à 1,2 pour cent d'acide lactique, soit 100 à 120 °Dornic. On procède alors au découpage et au brassage du caillé par l'un des procédés ci-après: agitation mécanique à l'aide d'un brasseur à turbine ou à hélice; passage du gel à travers un tamis; homogénéisation à basse pression.

Ce traitement a pour but de rendre le caillé onctueux. Il doit être réalisé avec précaution. Si le brassage est trop violent et s'il s'accompagne d'une incorporation excessive d'air, il peut se produire une séparation du sérum. Si la dilacération du coagulum est insuffisante, le produit risque de devenir ultérieurement trop épais.

Le brassage terminé, le caillé est immédiatement et rapidement refroidi à une température inférieure à 10 °C. La réfrigération dans la cuve ou le tank se faisant trop lentement et pouvant provoquer une suracidification (sauf dans le cas de très petites capacités), celle-ci est réalisée par passage dans un échangeur-réfrigérant à plaques ou tubulaire ou à surface raclée. Le brassage du caillé au cours de la réfrigération améliore l'onctuosité du produit.

Le yaourt est ensuite conditionné en pots et conservé à +2 -+4 °C. L'addition éventuelle d'arômes, de pulpes de fruits, etc., se fait au moment du remplissage des pots. L'addition du sucre peut se faire avant incubation, à condition de ne pas dépasser 6 pour cent afin de ne pas ralentir la fermentation. Pour conserver au yaourt brassé sa consistance semi-liquide, le mélange d'additifs (fruits + sucre) ne doit pas dépasser 15 pour cent.

Yaourt à boire

Il s'agit d'un yaourt qui se différencie du brassé par son état liquide qui l'assimile à une boisson. Sa fluidité est obtenue par une diminution de la teneur en matière sèche. Le brassage fait par passage à l'homogénéisateur sous pression inférieure à 50 atmosphères donne une viscosité inférieure d'environ 50 pour cent à celle obtenue par brassage mécanique. Il peut être nature ou aromatisé.

Conservation des yaourts

Préparés selon une technologie rigoureuse et dans des conditions hygiéniques strictes, ces produits peuvent se conserver environ 3 semaines sous réserve d'être maintenus au froid. Au cours de la commercialisation, la température ne doit pas excéder 8 °C. Dans les pays où la chaîne du froid du fabricant au consommateur n'existe pas, les délais de distribution et de consommation doivent être beaucoup plus courts.

Si le maintien des yaourts au froid empêche la multiplication bactérienne, il n'arrête pas complètement leur activité métabolique. Bien que lente, la production d'acide lactique se poursuit; des enzymes hydrolysent les protéines avec, comme conséquences, une diminution de la fermeté et de la viscosité et l'apparition de peptides à goût amer. Pour ces raisons, on procède parfois, quand la réglementation le permet, à un traitement thermique après la fermentation.

Dans de nombreux pays, pour avoir droit à la dénomination «yaourt» le produit doit, au moment de la vente, contenir des bactéries spécifiques vivantes en nombre important; un nombre minimum peut être fixé, par exemple 100 millions par millilitre.

Accidents de fabrication

Le traitement thermique du lait et le bon pH (généralement inférieur à 4, soit environ 1 pour cent d'acide lactique) rendent peu probable la présence ou la croissance dans le yaourt de bactéries pathogènes ou nuisibles. Toutefois, une contamination massive, notamment lors du conditionnement, peut être à l'origine d'accidents, d'où la nécessité de travailler dans des locaux propres, secs, sains et à l'abri des courants d'air. Pour prévenir ces contaminations, on a développé des machines permettant de faire du conditionnement «propre», «ultra-propre» ou «aseptique».

Certains additifs, notamment le sucre et les fruits, peuvent être responsables de contaminations par des germes variés et doivent toujours être surveillés. Les autres défauts de goût, d'apparence ou de consistance pouvant survenir sont généralement dus à des erreurs technologiques, à des matières premières de mauvaise qualité ou à de mauvais choix dans les ferments.

AUTRES LAITS FERMENTÉS

Il existe un grand nombre de laits fermentés qui diffèrent par leur matière première, leur flore microbienne, leur technologie, leur texture, leur goût et leur durée de conservation. Certains sont voisins, mais présentés sous des noms variés. Beaucoup d'entre eux contiennent l'une ou les deux bactéries spécifiques du yaourt associées à d'autres micro-organismes. Depuis plusieurs années, des fabricants cherchant de nouveaux débouchés ont repris, avec l'aide de scientifiques, l'idée émise par Metchnikoff au début du XXe siècle que la consommation des laits fermentés peut avoir un effet favorable sur la santé et constituer une «bactériothérapie lactique». C'est ainsi que sont apparus des produits contenant des bactéries intestinales comme des bifidobactéries en association avec des bactéries lactiques.

On trouvera ci-après un bref résumé des technologies des principaux laits fermentés, fabriqués depuis une époque très ancienne ou récente.

Lait à l'acidophile

Le lait entier ou écrémé est soumis à un traitement thermique. Selon les fabricants il est:

- soit pasteurisé à 95 °C pendant 30 secondes;
- soit chauffé pendant 1 heure à une température proche de l'ébullition;
- soit chauffé deux fois de suite pendant 1 heure à 90 °C;
- soit stérilisé sous pression à 115 °C;
- soit traité par UHT (quelques secondes à 141-145 °C).

Après refroidissement à 37 °C, il est ensemencé avec 1 à 5 pour cent d'une culture pure de *Lactobacillus acidophilus*. Ce germe est isolé de selles de nourrissons au sein ou d'excréments de jeunes veaux. Le lait est ensuite généralement mis en bouteille et maintenu à 36-37 °C jusqu'à ce qu'il coagule, ce qui demande de 20 à 24 heures. Il est alors mis au froid (vers 5 °C) jusqu'à sa consommation, qui doit être rapide afin d'éviter une acidification excessive (supérieure à 1,8 pour cent d'acide lactique) et une baisse de la teneur en bactéries vivantes.

Le produit se présente comme une crème d'odeur légère et de saveur acidulée particulière. Dans certains pays, il est apprécié comme aliment

hygiénique. Il existe un lait fermenté préparé à l'aide de levain yaourt associé au *Lactobacillus acidophilus.*

Laits fermentés aux bifidobactéries

Ce sont des laits fermentés à l'aide de bifidobactéries associées à diverses bactéries. Il en existe plusieurs types:

- type levain yaourt + bifidobactéries + *Lactobacillus acidophilus*;
- type levain yaourt + bifidobactéries, soit d'origine humaine, soit d'origine animale.

Les produits faits avec une bifidobactérie d'origine animale, essentiellement *Bifidobacterium animalis*, sont actuellement les plus répandus. Leur technologie est celle du yaourt (incubation entre 42 et 45 °C) à la condition de choisir des souches de *B. animalis* capables de résister en milieu acide (pH 4,5-4,2) et en anaérobiose relative.

Les produits faits avec une bifidobactérie d'origine humaine, essentiellement *Bifidobacterium longum*, demandent de profondes modifications de la technologie du yaourt: les souches de levain yaourt doivent être capables d'acidifier le lait à 37 °C; l'acidification doit être lente et modérée; la fermentation et le conditionnement en anaérobiose relative sont nécessaires; la résistance relative au pH de *B. longum* impose une variation de 4,8 à 4,4 durant la conservation du produit. Ces contraintes demandent, d'une part, une grande maîtrise du procédé de fabrication et, d'autre part, une sélection des micro-organismes accompagnant la bifidobactérie de façon à obtenir un produit de goût et de texture agréables et une bonne survie du *B. longum.*

Laits fermentés alcoolisés

Les deux plus connus sont le kéfir et le koumis.

Kéfir. Originaire du Caucase, ce produit s'est largement répandu, notamment dans l'ex-URSS, où il est fabriqué industriellement. Il peut être préparé avec le lait de différentes espèces (vache, chèvre, brebis).

Dans les préparations traditionnelles, on fait macérer du lait contenu dans une outre, en présence d'un fragment d'estomac de mouton, de veau ou de

chèvre. Après coagulation, on remplace le produit par du lait frais, et ceci pendant quelques semaines au bout desquelles apparaît peu à peu sur la paroi interne de l'outre une croûte spongieuse et blanchâtre. Celle-ci, divisée et séchée, constitue les grains de kéfir.

Mis seuls dans du lait, ils donnent une boisson fermentée mousseuse acido-alcoolique. Les grains de kéfir desséchés se présentent sous l'apparence de petites masses dures, mamelonnées, jaunâtres ou brunâtres dont la dimension moyenne est celle d'une noisette. Ils sont constitués d'une flore complexe en état de latence et d'un polysaccharide à base de glucose et de galactose. Cette flore, protégée par une gaine de caséine desséchée, peut se conserver environ un an. Elle est toujours constituée de diverses espèces de bactéries lactiques (streptocoques, lactobacilles) et de levures. Elle peut être accompagnée de micro-organismes, dont certains sont indésirables: moisissures, germes de la putréfaction, germes de fermentations acétique et butyrique.

La préparation du kéfir se fait à partir de lait entier ou écrémé dans lequel on met des grains de kéfir préalablement revivifiés. La revivification des grains desséchés se fait par leur macération pendant 6 à 8 heures dans de l'eau bouillie tiède plusieurs fois changée. Après lavage éventuel dans de l'eau bicarbonatée à 10 g/litre, rinçage, tamisage et triage, ils sont prêts à l'emploi. On élimine les grains mous, translucides ou grisâtres pour ne conserver que ceux gonflés, élastiques et dont la couleur s'est éclaircie.

Ces grains sont immergés dans du lait pasteurisé ou bouilli refroidi à 16-20 °C à raison de 10 g de grains pour 100 g de lait. Après 24 heures d'incubation à cette température, les grains sont à nouveau tamisés, triés, rincés et remis dans une quantité de lait à 16-20 °C un peu plus grande. Après avoir recommencé l'opération pendant 4 ou 5 jours, la fermentation commence, provoquant des bulles de CO_2 au niveau des grains qui remontent à la surface. Si l'on poursuit ainsi pendant environ 6 à 10 jours, on observe que tous les grains remontent à la surface dans les heures suivant l'ensemencement. La revivification est alors terminée. Chaque grain devenu blanc mat et très élastique est capable de coaguler 30 à 40 fois son poids de lait.

Dans la fabrication artisanale, on se contente souvent d'utiliser les grains après une première incubation de 24 heures dans le lait à 16-20 °C. On les

ensemence dans du lait préalablement bouilli et refroidi à raison de 2 pour cent (en poids) et on conditionne le mélange dans des bouteilles fortement bouchées à 16-20 °C. On peut aussi, après 24 heures d'incubation, mettre en bouteilles fermées le lait coagulé séparé des grains par tamisage. La fermentation à 16-20 °C se poursuit pendant 1 à 4 jours selon que l'on désire une boisson plus ou moins acide, gazeuse et alcoolisée. On distingue ainsi:

- le kéfir faible ou jeune, qui est un liquide crémeux, très légèrement mousseux, de consistance homogène, de saveur douce, peu acide et peu alcoolisé;
- le kéfir moyen, crémeux, mousseux, avec un goût de crème acidifiée;
- le kéfir fort, très aromatique, riche en CO_2 et donc très mousseux, très acide et alcoolisé.

En moyenne, l'acidité du kéfir est voisine de 0,6 à 1 pour cent d'acide lactique (pH 4,2-4,5) avec une teneur en alcool de 0,6 à 0,8 pour cent et 50 pour cent en volume de gaz carbonique. Le kéfir fort peut contenir 2,5 pour cent d'alcool.

Une méthode industrielle russe consiste à ensemencer des grains revivifiés dans 40 à 50 fois leur poids de lait pasteurisé ou bouilli et refroidi à 16-20 °C. Le mélange mis à l'obscurité est remué toutes les 2 ou 3 heures. Au bout de 24 heures, les grains remontent à la surface. Le produit filtré donne un liquide crémeux, acide et à odeur levurée qui constitue le levain. Celui-ci est mis dans du lait pasteurisé 3 à 5 minutes à 85-90 °C, refroidi à 20-25 °C et placé en tank où la fermentation se fait à cette température pendant environ 10 à 12 heures. Le coagulum mou est brassé lentement et refroidi dans le tank vers 12-15 °C, puis laissé au repos pendant 12 à 18 heures afin que s'opère la fermentation lactique. Après ce temps, le caillé est amené à la température de 5 °C, puis conditionné en bouteille de verre ou en carton.

Koumis. Ce produit originaire des steppes de l'Asie centrale est fabriqué avec du lait de jument. Un produit très voisin est préparé avec du lait de chamelle et quelquefois d'ânesse. Il existe des imitations industrielles faites avec du lait de vache additionné de 2,5 à 5 pour cent de sucre. Comme pour le kéfir, la fermentation résulte d'une flore mixte et complexe faite de bactéries lactiques et de levures.

Il s'agit d'un liquide laiteux, consommé abondamment comme boisson par les éleveurs lors de la saison de production. Le coagulum, finement dispersé, est peu perceptible lors de la dégustation. La fabrication du koumis reste très traditionnelle en raison des faibles quantités de lait de jument ou de chamelle disponibles. La méthode de préparation ci-après pour un koumis imitation au lait de vache est transposable à d'autres laits.

Le lait est mélangé par moitié avec du lait écrémé chaud dans lequel on a dissous 5 pour cent de sucre. Après pasteurisation du lait 3 à 5 minutes à 90-92 °C, le mélange est refroidi à 26-28 °C et ensemencé à l'aide de 10 pour cent d'un levain koumis avec agitation constante pendant une vingtaine de minutes. La fermentation s'effectue en cuve ou en tank à 26-28 °C pendant une durée variable selon le produit recherché. Le caillé obtenu est ensuite brassé et refroidi. Dans les fabrications industrielles, le brassage se fait, par exemple, par injection d'air dans le caillé pendant 3 à 5 minutes chaque quart d'heure en même temps qu'il est refroidi à 16-18 °C par circulation d'eau glacée dans la double enveloppe de la cuve. Après obtention d'un produit fluide, homogène et légèrement pétillant, celui-ci est mis en flacons fermés hermétiquement. Ces derniers sont maintenus à environ 20 °C pendant environ 2 heures de façon à augmenter la teneur en alcool et en CO_2. Ils sont ensuite placés en chambre froide vers 4 °C jusqu'à leur distribution.

On connaît, comme pour le kéfir, trois types de koumis:

- le koumis jeune ou doux, obtenu par fermentation d'une journée environ et contenant environ 1 pour cent d'acide lactique et de 0,1 à 0,3 pour cent d'alcool;
- le koumis moyen, fermenté en 2 jours, contenant environ 1,2 pour cent d'acide lactique et de 0,2 à 0,5 pour cent d'alcool;
- le koumis fort, d'une fermentation de 3 jours, contenant environ 1,4 pour cent d'acide lactique et jusqu'à 3 pour cent d'alcool.

Produits divers

Il en existe un grand nombre. Parmi ceux-ci on peut citer les laits acidifiés et le *buttermilk.*

Un lait acidifié largement consommé dans les pays chauds et en particulier en Afrique du nord et au Moyen-Orient est le *Leben* ou *Lben*. Il est préparé

à l'aide de lait le plus souvent partiellement ou totalement écrémé. Dans les pays où la production laitière est faible, on utilise fréquemment du lait reconstitué (1 kg de poudre de lait écrémé pour 10 l d'eau). Après pasteurisation et dégazage éventuel, le lait est refroidi à 20-22 °C et ensemencé au moyen de 2,5 à 3 pour cent d'une culture de bactéries lactiques mésophiles.

La fermentation se poursuit pendant 18 à 20 heures environ jusqu'à coagulation et obtention d'une acidité de 0,65 à 0,70 pour cent d'acide lactique (de 65 à 70 °Dornic). Le caillé est alors plus ou moins finement divisé et brassé en même temps qu'il est refroidi vers 4-5 °C. Il est ensuite mis en conditionnement de vente ou vendu en vrac. Au froid, ce produit légèrement acide et au goût agréable peut se conserver 1 semaine. Il peut être préparé avec des laits de diverses espèces (brebis, chèvre). La fermentation faite généralement avec des bactéries lactiques mésophiles l'est aussi avec des thermophiles: certaines souches sont recherchées pour leur propriété qui consiste à rendre le produit visqueux et filant.

Dans certains pays producteurs de beurre, le babeurre issu du barattage est consommé comme boisson ou utilisé en cuisine. Lorsque la quantité de babeurre est insuffisante, on fabrique du *cultured buttermilk* à partir d'un lait acidifié. On part d'un lait écrémé ou à faible teneur en matière grasse (de 0,1 à 0,8 pour cent) et additionné de 0,1 pour cent de sel pour relever le goût. La matière sèche peut être augmentée par apport de 1 à 2 pour cent de lait écrémé en poudre. Le lait est chauffé en cuve pendant 20 à 30 minutes à 80-90 °C ou pasteurisé à 90-95 °C pendant un temps variable (de 1 à 5 minutes).Ce chauffage poussé a pour but d'améliorer la viscosité et la stabilité du produit.

Le lait refroidi à 21-23 °C est ensemencé à l'aide de 0,5 à 3 pour cent d'un levain associant diverses espèces de bactéries lactiques mésophiles. Après 14 à 16 heures d'incubation à 22 °C, on obtient un coagulum dont l'acidité est voisine de 0,8 pour cent d'acide lactique (pH 4,7-4,6). Ce caillé est refroidi entre 3 et 6 °C en même temps qu'il est rompu et brassé très lentement pendant 2 heures, puis conditionné par gravité ou par pompage ne modifiant pas la structure du produit. A 4 °C il peut se conserver environ deux semaines. Afin de donner au produit une texture voisine de celle du

babeurre normal, on peut baratter le caillé pendant 15 minutes ou encore l'homogénéiser à 5 °C sous une pression de 5 bars.

Pour obtenir l'aspect du babeurre de baratte, on peut ajouter des grains de beurre congelés de façon à ce qu'ils se dispersent facilement. Le produit peut être coloré et aromatisé. Le *buttermilk* doit avoir un pH de 4,5, une saveur acide aromatique et une texture visqueuse sans séparation de sérum.

INTÉRÊT NUTRITIONNEL DES LAITS FERMENTÉS

La fermentation du lait conduisant à la formation d'acides organiques, notamment d'acide lactique, entraîne une acidification du lait. Ces laits fermentés peuvent résulter d'ensemencements spontanés à température ambiante, ou d'ensemencements par une flore et à une température contrôlées. Ce contrôle porte sur le choix des espèces et des souches en fonction de leur intérêt technologique (texture du produit) ou organoleptique.

Ces produits laitiers fermentés ajoutent leurs propriétés propres aux qualités nutritionnelles du lait utilisé. En particulier, l'acidification constitue du point de vue hygiénique un atout majeur. En effet, elle prévient la croissance de la plupart des germes pathogènes et assure, par des moyens qui peuvent être très simples, la conservation du lait.

De très nombreuses souches et espèces de bactéries lactiques sont utilisées pour la fabrication des laits fermentés (streptocoques et lactobacilles). Depuis peu, on utilise aussi des bactéries d'origine intestinale telles que les bifidobactéries. Certaines levures sont aussi utilisées, en association avec des bactéries, par exemple pour le kéfir. Par contre, les moisissures sont rarement utilisées dans la fabrication des laits fermentés traditionnels.

Traditionnellement, et plus particulièrement depuis les travaux de Metchnikoff sur le yaourt au début de ce siècle, les produits laitiers fermentés jouissent d'une image positive quant à leurs relations avec la santé. Cependant, il aura fallu attendre les années 80 pour que des faits scientifiques établissent certaines de ces propriétés. La plupart de ces travaux ont porté sur le yaourt, produit répandu, de flore simple et bien connue, pour laquelle il a été rapidement montré qu'elle était capable de survivre pendant son passage dans l'intestin, sans toutefois s'y implanter.

Effets de la fermentation sur la composition du lait

L'effet majeur de la fermentation lactique sera l'hydrolyse des glucides du lait. Le lactose, quantitativement le principal composant solide du lait, est présent dans le yaourt hydrolysé à raison de 30 pour cent environ pour donner, pour chaque molécule, une molécule de galactose et deux molécules d'acide lactique. Il ne faut guère plus de trois heures à 45 °C pour que les bactéries transforment un lait en yaourt qui contiendra environ 1 pour cent d'acide lactique sous les formes racémiques L (+) et D (-) en proportions variables selon les conditions de fabrication et de stockage. La production d'acide lactique au cours de la fermentation conduit à un abaissement du pH qui aura pour effet de cailler le lait.

L'homme métabolise les deux formes, la forme D (-) plus lentement que la forme L (+) . Selon le comité *ad hoc* FAO/OMS de 1973, la situation est différente chez le nouveau-né: l'immaturité du foie ne lui permettrait pas de métaboliser complètement la forme D (-), entraînant ainsi un risque d'acidose. Pour cette raison, le comité recommande de ne pas donner d'aliments contenant de l'acide lactique D (-) avant l'âge de trois mois.

Les autres sources énergétiques, les lipides et les protéines du lait, sont peu modifiées par la fermentation, hormis la formation d'un coagulum. Il existe une protéolyse modérée et les acides aminés libérés sont importants pour assurer la croissance symbiotique des bactéries du yaourt. Il faut noter par ailleurs que, pour la fabrication du yaourt, il peut être d'usage d'enrichir le lait en poudre de lait. C'est ainsi qu'en France, le yaourt est le plus souvent plus riche que le lait en divers nutriments (protéines, calcium, etc., et parfois même en lactose). D'autre part, ces produits peuvent être plus ou moins sucrés. Leur teneur en saccharose varie alors de 7 à 15 pour cent.

La teneur vitaminique du lait de départ est modifiée par la fermentation; certaines vitamines sont consommées par les bactéries, d'autres sont produites. Les travaux publiés à ce jour sont souvent contradictoires. Il ressort, cependant, une augmentation importante de la teneur en acide folique du yaourt.

Des travaux récents et précis peu nombreux tendent à montrer d'importantes différences dans la digestion des protéines selon la technologie subie par le lait. Ainsi, selon Scanff *et al.* (1990), avec le lait, il se forme rapidement

un caillot de caséine dans l'estomac, celle-ci étant évacuée lentement sous forme de peptides. Avec le yaourt, il ne se forme pas de coagulum et, très rapidement, la caséine est évacuée sous forme dégradée et même sous forme non dégradée. Il a été aussi montré que le temps de transit du yaourt dans l'intestin est plus long que celui du lait.

Effets sur la tolérance au lactose

Parmi les causes d'intolérance au lait, la mieux connue est certainement celle liée au lactose. Par défaut de lactase (ou ß-galactosidase) dans la bordure en brosse de la muqueuse intestinale, le lactose n'est plus hydrolysé; il n'est donc plus absorbé dans l'intestin grêle et va atteindre le colon, où il sera fermenté par la flore intestinale en donnant naissance à des gaz et tout particulièrement à de l'hydrogène. Les symptômes de l'intolérance au lactose sont brièvement présentés au chapitre 9.

Le plus souvent, chez l'enfant, l'intolérance au lactose est due à un déficit en lactase intestinale secondaire à une entéropathie. Chez l'adolescent et l'adulte, la malabsorption du lactose est le plus souvent primaire. Une réponse à l'intolérance au lactose pourrait consister en l'utilisation de laits délactosés. Cependant, on verra au chapitre 9 que les laits fermentés et, en particulier, le yaourt sont susceptibles d'apporter une solution simple et peu onéreuse.

Effets sur la flore intestinale

Un certain nombre de travaux chez l'animal montrent que l'ingestion de laits fermentés est susceptible de modifier la flore intestinale de l'hôte, en particulier de diminuer la quantité de germes indésirables. On dispose, par contre, de très peu d'informations sur son effet chez l'homme. Plusieurs études depuis les années 50 indiquent que l'ingestion de lait fermenté par *Lactobacillus acidophilus* est susceptible de réduire le nombre d'*Escherichia coli* dans les selles qui contiennent alors considérablement plus de *L. acidophilus* qui, par ailleurs, fait partie de la flore intestinale humaine. Cette propriété semble avoir été utilisée avec succès dans le cas d'enfants souffrant de diarrhées à *E. coli*.

Parmi les activités métaboliques de la flore, on s'est particulièrement

intéressé à des activités enzymatiques qui sont associées, chez l'animal de laboratoire et chez l'homme, à la formation de substances cancérogènes. L'ingestion de différents laits fermentés fait baisser l'activité de ces enzymes chez l'animal. Toutefois, il faut noter qu'il n'a pas été démontré chez l'homme de relation entre l'activité de ces enzymes et la survenue de cancers du colon.

Sensibilité aux infections et réponse immunitaire

L'ingestion de laits fermentés semble entraîner des modifications des défenses immunitaires à plusieurs niveaux. C'est ainsi que l'on a suggéré la possibilité d'une augmentation de certaines immunoglobulines après ingestion de yaourt ou de *Lactobacillus acidophilus* ou encore de *L. casei*, ainsi qu'un rôle dans la migration des macrophages périphériques vers le foie (De Simone *et al.*, 1988). D'autres recherches concernent une possible stimulation de la production de cytokines, protéines importantes dans la régulation du système immunitaire ainsi que pour leur action antibactérienne et antivirale, parmi lesquelles figurent les interférons (Solis et Lemonnier, 1991 et 1992).

Autres effets

Laits fermentés et lipides sanguins. Les relations entre les produits laitiers et la régulation de la cholestérolémie sont paradoxales. En effet, s'il est bien établi qu'une consommation élevée de lipides saturés, dont le beurre, augmente le taux de cholestérol circulant, il ne semble pas que l'on retrouve cet effet lorsqu'on consomme, à taux lipidique égal, du lait, c'est-à-dire un produit laitier dont les lipides n'ont pas été extraits. Certaines recherches suggèrent, de plus, que le yaourt serait encore plus efficace que le lait pour maintenir une cholestérolémie basse. Il n'est toutefois pas possible d'affirmer un effet propre des laits fermentés sur la cholestérolémie.

Croissance et longévité. Un certain nombre de travaux sur des animaux suggèrent une amélioration de la croissance chez ceux qui reçoivent un régime enrichi en yaourt par rapport à d'autres produits laitiers. Toutefois,

la plupart d'entre eux n'ont pas été conduits assez rigoureusement pour pouvoir parvenir à des conclusions certaines.

Depuis les travaux de Metchnikoff, il est dit que le yaourt a un effet sur la longévité, mais là aussi les données expérimentales ou épidémiologiques sont quasiment inexistantes, même si Arai *et al.* (1980) signalent que la longévité des souris est accrue chez celles qui consomment un régime enrichi en lait fermenté, ceci par rapport à deux autres lots qui reçoivent soit un régime témoin de laboratoire, soit ce régime enrichi en lait. La flore intestinale des souris qui ont consommé le lait fermenté contient dix fois plus de *Bifidobacterium* que celle des deux autres groupes. Les recherches devraient être poursuivies pour asseoir l'intuition de Metchnikoff ou, au contraire, la rejeter.

Chapitre 6

Fromages

DÉFINITION ET CLASSIFICATION

Au plan technologique, le fromage est de la caséine plus ou moins débarrassée des autres constituants du lait et plus ou moins transformée. La norme FAO/OMS n° A-6 (1978, modifiée en 1990) donne la définition suivante:

«Le fromage est le produit frais ou affiné, solide ou semi-solide, dans lequel le rapport protéines de lactosérum/caséine n'excède pas celui du lait, obtenu:

- par coagulation du lait, lait écrémé, lait partiellement écrémé, crème de lactosérum ou babeurre, seul ou en combinaisons, grâce à l'action de la présure ou d'autres agents coagulants appropriés, et par égouttage partiel du lactosérum résultant de cette coagulation;
- par l'emploi de techniques de fabrication entraînant la coagulation du lait et/ou des matières obtenues à partir de lait, présentant des caractères physiques, chimiques et organoleptiques similaires à ceux du produit défini plus haut.»

Selon cette même norme:

- Le fromage «affiné» est celui qui n'est pas prêt à la consommation immédiatement après la fabrication, qui doit être maintenu pendant un certain temps à la température et dans les conditions nécessaires pour que s'opèrent les changements biochimiques et physiques caractéristiques du fromage.
- Le fromage «affiné aux moisissures» est celui dont l'affinage est provoqué essentiellement par la prolifération de moisissures caractéristiques dans la masse et/ou sur la surface du fromage.
- Le fromage «frais ou non affiné» est du fromage qui est prêt à la consommation peu de temps après la fabrication.

La classification des fromages selon la norme n° A-6 est donnée au

TABLEAU 55

Classification des fromages en fonction de la consistance, de la teneur en matière grasse et des principales caractéristiques d'affinage

Formule I		Formule II		Formule III
TEFD* (%)	Premier élément de dénomination	MGES** (%)	Second élément de dénomination	Dénomination d'après les principales caractéristiques d'affinage
<51	Pâte extra-dure	>60	Extra-gras	1. Affiné:
49-56	Pâte dure	45-60	Tout-gras	a.principalement en surface
54-63	Pâte demi-dure	25-45	Mi-gras	b.principalement dans la masse
61-69	Pâte demi-molle	10-25	Quart-gras	
>67	Pâte molle	<10	Maigre	2. Affiné aux moisissures:
				a.principalement en surface b.principalement dans la masse
				3. Frais

* TEFD = Pourcentage de la teneur en eau dans le fromage dégraissé, c'est-à-dire:

$$\frac{\text{Poids de l'eau dans le fromage}}{\text{Poids total du fromage - Matière grasse dans le fromage}} \times 100$$

** MGES = Pourcentage de la matière grasse dans l'extrait sec, c'est-à-dire:

$$\frac{\text{Teneur en matière grasse du fromage}}{\text{Poids total du fromage - Eau dans le fromage}} \times 100$$

Note: Soit, par exemple, un fromage ayant une TEFD de 57 pour cent et une MGES de 53 pour cent qui est affiné de la même manière que le Roquefort, sa dénomination sera alors:

Pâte demi-dure	*Tout-gras*	*Fromage affiné aux moisissures dans la masse*
(Formule I)	(Formule II)	(Formule III)

tableau 55. Elle est complétée par des normes individuelles précisant les caractéristiques particulières de divers fromages. De nombreux pays possèdent une réglementation propre concernant, notamment, la définition et la composition des produits.

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE FABRICATION

Le fromage est le produit obtenu par coagulation du lait suivie d'un égouttage du coagulum. Il est essentiellement constitué d'un gel de caséine

retenant les globules gras et une partie plus ou moins importante de la phase aqueuse du lait.

La fabrication du fromage comprend trois étapes:

- coagulation ou formation du gel ou coagulum;
- égouttage ou déshydratation du gel aboutissant à un caillé;
- affinage ou digestion enzymatique du caillé.

Cette dernière étape n'existe pas dans le cas des «fromages frais» consommés après égouttage. Ces trois étapes sont généralement précédées d'une phase préalable de préparation du lait.

Préparation du lait

Dans de nombreuses fabrications de fromages fermiers, le lait, encore tiède, est mis en coagulation dès la traite, après une simple filtration. Dans certains cas, on laisse le lait reposer quelques heures dans un local frais afin de procéder à un écrémage partiel en recueillant la crème montée à la surface et afin de permettre le démarrage de la flore lactique intervenant dans la coagulation et l'égouttage. Ces procédés ont l'avantage de permettre d'utiliser et de conserver sur place, de façon très simple, le lait et constituent un moyen non négligeable d'améliorer les ressources alimentaires et les revenus des éleveurs. Leur inconvénient est de donner des produits de qualité variable. En outre, ils sont inapplicables aux laits de mélange soumis au transport, à la réfrigération et au stockage, dont les aptitudes technologiques sont toujours modifiées et irrégulières.

A l'usine, la valorisation de ces laits ainsi que la nécessité de produire des fromages de composition régulière et de qualité hygiénique et organoleptique bonne et constante imposent la mise en œuvre d'une matière première dont le comportement est chaque jour identique. Pour cette raison, on est amené à faire subir au lait des correctifs avant de le mettre en fabrication. La préparation du lait comprend plusieurs opérations (citées ci-après), certaines pouvant être facultatives ou obligatoires selon la technologie, la réglementation, les produits voulus, etc.

Nettoyage du lait par filtration statique ou centrifuge. Il permet de retenir

les impuretés du lait. L'opération centrifuge est plus efficace; elle retient notamment les leucocytes.

Standardisation du lait en matières grasses et en matières protéiques. L'ajustement de la teneur en matières grasses se fait soit par apport de lait écrémé dans du lait entier, soit par apport de crème dans du lait entier. La standardisation en matières protéiques se fait par ajout au lait de poudre de lait, de caséine ou de caséinates, ou encore par ultrafiltration. La teneur en protéines du lait de fromagerie est le plus souvent comprise entre 33 et 40 g/litre au maximum.

Assainissement du lait. Il se fait très généralement à l'aide d'un traitement thermique. Il faut rappeler que la pasteurisation peut entraîner diverses modifications de la composition et de la structure physico-chimique du lait défavorables aux fabrications fromagères. Les protéines solubles retenues dans le caillé rendent l'égouttage difficile et peuvent être à l'origine, lors de la maturation, de saveurs défectueuses. Il faut souligner aussi une rupture de l'équilibre phosphocalcique du lait se traduisant par un appauvrissement en sels de calcium soluble qui provoque des difficultés de coagulation.

Le choix d'une combinaison temps/température en fromagerie se pose dans les termes suivants: ou bien le chauffage est suffisant pour assurer la destruction de tous les micro-organismes pathogènes, mais le lait subit des modifications gênantes pour certaines fabrications; ou bien le chauffage est modéré et ne modifie pas les aptitudes fromagères du lait, mais la sécurité hygiénique risque d'être insuffisante.

Pour éviter la confusion entre la pasteurisation et les traitements thermiques moins sévères utilisés en fromagerie, on leur réserve souvent le terme de thermisation. Sans offrir les garanties d'assainissement identiques à celles données par la pasteurisation telle qu'elle est pratiquée pour le lait de consommation, la thermisation constitue néanmoins un traitement assurant, outre la destruction d'une bonne partie des germes indésirables en fabrication, celle de la plupart des pathogènes. Les éventuels pathogènes résiduels sont, le plus souvent, inhibés sous l'action de l'acidification et de l'affinage.

Rééquilibrage en calcium. Pour redonner au lait pasteurisé (comme au lait refroidi) un comportement normal au cours de la coagulation et de l'égouttage, il suffit généralement de lui ajouter du chlorure de calcium anhydre à une dose maximale de 0,2 g/litre.

Maturation. Elle a pour but d'améliorer le lait en tant que milieu de culture pour les bactéries lactiques et d'amener le lait à son pH optimum d'emprésurage. Secondairement, elle contribue à reconstituer les équilibres physico-chimiques du lait ayant pu être perturbés par des traitements antérieurs (réfrigération principalement). Il existe diverses méthodes de maturation dont le choix est fonction de la qualité du lait reçu, de l'organisation du travail et de la nature du fromage.

Coagulation

La coagulation du lait correspond à une déstabilisation de l'état micellaire originel de la caséine. Les micelles de caséine doivent leur stabilité à deux facteurs:

- La charge de surface: les caséines ont un caractère acide très net; au pH normal du lait, elles ont un fort excès de charges négatives. Les micelles sont elles aussi chargées et de fortes répulsions électrostatiques empêchent leur rapprochement.
- Le degré d'hydratation: l'eau fixée par les micelles est importante (3,7 g par g de protéines); une partie de cette eau forme autour de chaque micelle une enveloppe d'hydratation protectrice.

En fromagerie, la déstabilisation est réalisée soit par voie fermentaire à l'aide de bactéries lactiques, soit par voie enzymatique à l'aide d'enzymes coagulantes, en particulier la présure.

Coagulation par acidification lactique. Sous l'action des bactéries lactiques, le lait s'acidifie progressivement. Cette acidification entraîne une neutralisation des charges négatives portées par les caséines. Dans le même temps se produit une déminéralisation progressive des micelles qui se désintègrent en sous-unités.

Lorsque le pH est voisin de 5, la charge des submicelles est très réduite et

la précipitation s'amorce. A pH 4,6 (point isoélectrique de la caséine), la neutralisation des charges est complète; les micelles de caséine floculent et se soudent formant au repos un gel homogène qui emprisonne le lactosérum et occupe entièrement le volume du lait. Au cours de la déminéralisation du complexe phosphocaséinate de calcium, le calcium colloïdal migre dans le sérum.

Coagulation par action de la présure. Diverses enzymes protéolytiques ont la propriété de coaguler le lait. Elles sont soit d'origine animale (présure, pepsine), soit d'origine végétale (broméline, ficine), soit d'origine microbienne (enzymes de certaines moisissures ou de bactéries). Les enzymes utilisées en fromagerie sont la présure, la pepsine et celles d'origine fongique. La plus ancienne et toujours très employée est la présure constituée d'un mélange de chymosine (80) et de pepsine (20); elle est sécrétée dans la caillette des jeunes ruminants nourris au lait. Outre son activité coagulante, spécifique sur la caséine, la chymosine a une activité de protéolyse générale pouvant se manifester sur toutes les protéines.

La coagulation du lait par la présure comprend deux phases: une phase enzymatique, au cours de laquelle la chymosine dégrade la caséine κ de façon spécifique, et une phase de coagulation, qui correspond à la formation du gel par agrégation des micelles modifiées.

Coagulums de fromagerie. Les mécanismes d'action de la présure et de l'acide lactique, très différents, aboutissent à deux types de coagulums dont les aptitudes à l'égouttage et à l'affinage sont spécifiques de leur mode de formation. Entre ces types extrêmes se placent les coagulums obtenus par l'action simultanée de l'acidification et de l'enzyme.

Les caractères de ces caillés dits mixtes sont déterminés par l'importance relative de chaque agent coagulant. La coagulation strictement acide est peu utilisée, sauf dans quelques fabrications fermières. L'action enzymatique seule conduit à un coagulum qui, pour être transformé en fromage, nécessite une acidification. Ainsi, un coagulum de fromagerie résulte presque toujours de l'action combinée de l'enzyme et de l'acidification. Toutefois, son caractère est différent selon que l'acidification débute avant l'emprésurage

(pâtes molles et certaines pâtes pressées non cuites) ou que l'acidification débute après l'emprésurage et la gélification (pâtes pressées cuites).

Selon le mode de coagulation dont ils résultent, on classe habituellement les coagulums en trois types conduisant à trois grandes catégories de fromage: coagulums à caractère lactique dominant (type «pâte fraîche»: fromages blancs, petits suisses, cottage, quarg, etc.); coagulums à caractère présure dominant (type «pâte pressée»: saint-paulin, edam, cantal, cheddar, gruyère); coagulums à caractère mixte (type «pâte molle»: camembert, brie, munster, bleu, etc.).

Le tableau 56 donne les principaux caractères des coagulums et des fromages dont ils sont issus, en fonction du mode de coagulation.

Egouttage

Le gel formé par acidification ou par action de la présure est dans un état physique instable. Plus ou moins rapidement selon la nature du coagulum, la phase dispersante se sépare spontanément du coagulum sous forme de lactosérum. Ainsi, en observant un gel au repos, on voit spontanément sourdre à sa surface de fines gouttelettes qui grossissent, se rejoignent en traînées festonnées et finalement forment un film liquide. En même temps, le gel se décolle des parois du récipient et diminue de volume.

L'égouttage est le résultat de deux phénomènes physiques différents:

- un phénomène actif, la synérèse, qui est dû à la contraction du gel; il est particulièrement important dans les coagulums présure;
- un phénomène passif, résultant de l'aptitude du coagulum à laisser s'écouler le lactosérum occlus; cette exsudation spontanée du sérum, liée à la perméabilité du coagulum, est une des caractéristiques des gels lactiques.

La séparation du lactosérum s'accompagne d'une ségrégation des différents composants originels du lait: la plus grande partie de l'eau et du lactose ainsi qu'une petite fraction de la matière grasse et des protéines sont éliminées par le sérum; la plus grande partie des protéines et de la matière grasse est retenue par le coagulum, dont l'extrait sec croît progressivement à mesure de l'élimination du sérum.

L'acidification du lait avant et après coagulation élimine dans le lactosé-

TABLEAU 56

Caractéristiques des coagulums et des fromages en fonction du mode de coagulation

Caractéristiques	Modes de coagulation	
	Voie enzymatique (présure)	Voie fermentaire (acide lactique)
Coagulums		
Temps de floculation	Court (de 10 à 30 minutes)	Long (de 6 à 15 heures)
pH	6,70-6,50	<4,5
Minéralisation	Forte (1-1,2 g Ca/100 g)	Faible (0,1 g Ca/100 g)
Structure micellaire	Modifiée	Détruite
Fermenté	Faible	Forte
Friabilité	Faible	Forte
Plasticité	Faible	Forte
Elasticité	Forte	Faible
Perméabilité	Faible	Forte
Contractibilité	Forte	Faible
Tension	Forte	Faible
Aptitude aux traitements mécaniques	Forte	Faible
Egouttage	Rapide et important si actions mécaniques et thermiques fortes	Spontané, lent, faible
Aptitude à l'évaporation	Faible	Forte
Humidité du caillé égoutté	Faible	Forte
Cohésion du caillé égoutté	Forte	Faible
Fromages		
Minéralisation	Forte	Faible
Matière sèche	Elevée (60-65 %)	Basse (20-25 %)
Texture	Cohérente, liée, solide, élastique	Plastique, sans tenue
Format	Gros	Petit
Durée d'affinage	Longue ou moyenne	Courte ou nulle
Durée de conservation	Longue	Faible

rum les sels minéraux primitivement fixés sur la micelle de caséine. Le niveau de minéralisation résiduelle de la caséine détermine le degré de cohésion du coagulum, son aptitude à l'égouttage ainsi que la matière sèche finale du fromage.

La technique de fabrication propre à chaque type de fromage vise à développer dans le coagulum, en un temps déterminé, une acidification d'intensité appropriée pour obtenir des caractères physico-chimiques spécifiques au produit fini non affiné désiré.

Salage

Il a un triple rôle: il complète l'égouttage et contribue à la formation de la croûte; il règle l'activité de l'eau (Aw) du fromage et par là favorise, freine ou oriente le développement des micro-organismes et les activités enzymatiques au cours de l'affinage; il relève la saveur du fromage et masque ou exalte le goût de certaines substances formées au cours de l'affinage.

On utilise deux procédés de salage: le salage à sec des fromages par saupoudrage à la main ou à la machine, par frottage ou par incorporation dans le caillé; le salage en saumure généralement saturée (318 g/litre à 20 °C). La plupart des fromages ont une teneur en sel de 1,5 à 2,5 pour cent. Certains fromages orientaux (fêta) conservés en saumure ont un taux de sel de 8 à 15 pour cent et sont généralement dessalés avant leur consommation.

Affinage

A la fin de l'égouttage, le coagulum se trouve sous forme d'un gâteau de volume, de forme et de composition déterminés. Sauf dans le cas où ce coagulum est consommé à l'état frais, il subit alors un affinage (ou maturation) qui va modifier sa composition, sa valeur nutritive, sa digestibilité et ses caractères organoleptiques (aspect, consistance, saveur, odeur).

L'affinage correspond à un ensemble de dégradations enzymatiques, simultanées ou successives, du substrat (= le caillé) préparé par la coagulation et l'égouttage. Il constitue un processus très complexe en raison de la nature du substrat, de la diversité des agents responsables, de la variété des transformations et du nombre de produits formés. Il est dominé par plusieurs phénomènes biochimiques dont les plus importants sont la fermentation du

lactose, la dégradation enzymatique des protéines et l'hydrolyse de la matière grasse. Les protéines sont hydrolysées en éléments de plus en plus simples et à sapidité croissante: polypeptides, peptides, acides aminés, ammoniac. La dégradation de la matière grasse est surtout notable dans le cas des pâtes persillées. Les triglycérides sont hydrolysées en acides gras et glycérol, eux-mêmes pouvant être transformés en résidus plus sapides et aromatiques (aldéhydes, cétones).

TECHNOLOGIE DES PRINCIPAUX TYPES DE FROMAGE

Fromages issus de coagulation lactique

Il s'agit des fromages frais ou à pâte fraîche. La coagulation a un caractère acide prédominant. Elle est obtenue par un ensemencement du lait avec des bactéries lactiques mésophiles à la dose de 1 à 3 pour cent et à la température de 18 à 25 °C. Elle est complétée par une faible addition de présure (de 1 à 5 ml de présure au 1/10 000 pour 100 litres) seulement destinée à donner une légère contractilité au caillé.

Le processus de coagulation est essentiellement tributaire de la vitesse d'acidification. Le temps de floculation varie de 6 à 15 heures. Le temps de tranchage ou de coagulation totale est de l'ordre de 16 à 48 heures. En fin de coagulation, l'acidité du sérum est élevée (de 65 à 100 °Dornic) et le pH bas (4-4,5). Le coagulum est ferme, friable, perméable. Son aptitude à l'égouttage est faible; la matière sèche dégraissée finale est toujours inférieure à 30 pour cent et varie le plus souvent entre 12 et 22 pour cent.

L'égouttage spontané est lent et incomplet; aussi, en pratique, il est nécessaire, pour obtenir un fromage suffisamment goutté dans des délais acceptables, d'exercer une action mécanique limitée sur le coagulum. Dans les procédés traditionnels, cette action consiste en un découpage sommaire associé à un très léger brassage et à un pressage réalisé lors de la mise en sacs du caillé et du retournement de ceux-ci. Dans ces conditions, l'égouttage reste néanmoins long (de 24 à 48 heures).

La centrifugation permet de réaliser l'égouttage de façon presque instantanée. Afin de rendre le caillé moins friable et éviter des pertes excessives de matière sèche dans le sérum, on accentue légèrement le caractère présure

du coagulum par des doses de présure et des températures de coagulation un peu plus élevées.

La pâte obtenue en fin d'égouttage se caractérise par une forte humidité, un pH bas (4-4,2) qui lui confère son goût acidulé et une faible minéralisation (0,1 pour cent de calcium, 0,2 pour cent de phosphore). Elle contient encore, sous forme d'acide lactique, environ 25 pour cent du lactose du lait.

La teneur élevée en eau et le faible degré de minéralisation entraînent un manque de tenue et de cohésion du fromage, qui se présente généralement sous forme d'une pâte qu'il faut conditionner dans des récipients rigides et étanches. La consommation s'effectue sans affinage dès la fin de l'égouttage après incorporation éventuelle de crème, de sel, de sucre, d'épices, etc.

Fromages issus de coagulation mixte

La coagulation est réalisée par action conjointe de la présure et de l'acide lactique. Cependant, la formation du coagulum se fait généralement sous l'action dominante de la présure. C'est ensuite, progressivement, qu'il acquiert des caractères lactiques. Selon les pâtes, les doses de présure au 1/10 000 varient de 15 à 25 ml pour 100 litres, celles des levains lactiques de 1 à 3 litres pour 100 litres et la température de coagulation de 28 à 32 °C.

En jouant dans les limites précitées sur les paramètres ci-dessus, on obtient un coagulum présentant, de façon plus ou moins accentuée en fonction du fromage désiré, les caractères ci-après: bonne perméabilité et aptitude à l'égouttage spontané du fait de l'acidification; contractilité moyenne déterminée par une minéralisation modérée; possibilité d'interventions mécaniques accélérant l'égouttage (tranchage, brassage léger) dans la mesure où la friabilité reste sans excès, c'est-à-dire où l'acidification et la déminéralisation ne sont pas trop poussées.

Les pâtes obtenues ont une teneur en matière sèche comprise entre 42 et 55 pour cent, un degré de minéralisation limité (0,2-0,3 pour cent de Ca), un pH bas (4,2-4,5). L'affinage est de durée variable, mais toujours assez courte (de 10 jours à 2 mois).

Fromages issus de coagulation présure

Ce sont les fromages à pâte pressée. Ils se caractérisent par une coagulation

à caractère présure dominant, obtenue par l'utilisation de doses élevées de présure (de 25 à 40 ml de présure au 1/10 000 pour 100 litres de lait) dans des conditions de température favorables à l'action de l'enzyme (de 32 à 40 °C). En outre, le caractère lactique reste très limité par la mise en œuvre de lait frais ensemencé avec de faibles doses de ferments acidifiants (de 0,5 à 1 litre pour 100 litres de lait). Le temps de floculation est court (de 10 à 30 minutes).

Ainsi, le calcium et le phosphore restent intégrés dans la «charpente» de phosphoparacaséinate de calcium, de sorte que le caillé présente un degré de minéralisation élevé (Ca = 0,6 à 1,2 pour 100 g; P = 0,3 à 0,8 pour 100 g) et, de ce fait, est souple, peu friable et apte à l'égouttage mécanique.

L'égouttage est rapide et prononcé. La teneur élevée en matière sèche (de 45 à 70 pour cent) est obtenue par la mise en œuvre de plusieurs traitements physiques (tranchage, brassage, lavage, chauffage, pressage) permettant de rompre énergiquement l'imperméabilité du gel. Pour être efficaces, ces traitements doivent être accompagnés d'une acidification très modérée et bien contrôlée du caillé qui, en déminéralisant partiellement le complexe de phosphoparacaséinate de calcium va le rendre perméable tout en permettant l'obtention de fromages très minéralisés, ayant une forte cohésion et pouvant être de gros format. Le pH en fin d'égouttage est voisin de 5-5,2. La quasi-totalité du sérum est éliminée au cours du travail en cuve (généralement en moins de 2 heures); le pressage final en moules sert beaucoup plus à former le fromage qu'à l'égoutter.

L'affinage débute par la neutralisation de la pâte. Celle-ci se fait essentiellement par l'intermédiaire du calcium mais est, dans certains fromages, complétée par le développement contrôlé en surface de moisissures et d'une flore neutralisante productrice d'ammoniac. La protéolyse qui suit se fait par voie enzymatique: présure et principalement protéases bactériennes. Dans les pâtes du type emmental se développe la fermentation propionique qui, par production de gaz, est responsable de l'ouverture, c'est-à-dire de formation de trous; elle contribue aussi au développement de la saveur. La durée de l'affinage est longue (de 3 semaines à 9 mois); elle varie dans le même sens que la matière sèche. La température des hâloirs est de l'ordre de 12 °C pour les fromages à pâte pressée non cuite. Pour les fromages à pâte

pressée cuite dans lesquels on recherche le développement de la fermentation propionique, l'affinage se fait généralement à deux températures: cave froide vers 12 °C; cave chaude à 20 °C environ. Les soins accompagnant l'affinage ont pour but essentiel de contrôler ou d'interdire la prolifération de flores s'implantant spontanément à la surface du fromage.

VALEUR NUTRITIONNELLE DES FROMAGES

La composition nutritionnelle de différents types de fromage est reprise au tableau 57. La simple lecture des chiffres montre que la valeur nutritive de 100 g de fromage varie parfois fortement selon le produit considéré.

Composant protéique

Constituants azotés propres au fromage. Au cours de la phase de maturation enzymatique du fromage (ou affinage), la protéolyse partielle de la matière première (essentiellement la caséine insoluble) libère un ensemble de produits de dégradation azotés. Ces substances solubles sont des oligopeptides, des acides aminés et des amines, de l'ammoniac et même des acides gras courts (produits de désamination). Selon les techniques de fabrication, chaque fromage possède des métabolites azotés à des concentrations propres, qui augmentent d'ailleurs au fur et à mesure que l'affinage progresse. La proportion de matière azotée soluble qui apparaît ainsi varie de 10 à 60 pour cent selon les fromages et peut atteindre 90 pour cent pour certains fromages à pâte molle trop faits.

Le taux des acides aminés libres varie de 0,6 à 1,2 pour cent. La teneur de chacun d'entre eux n'est pas toujours le reflet d'une simple hydrolyse de la caséine. On retrouve proportionnellement trop de lysine et les acides aminés les plus abondants sont la leucine et l'acide glutamique. Les taux de tyrosine et de tryptophane sont quant à eux des indices d'hydrolyse de la ß-caséine seulement. Des composés n'entrant pas dans la structure polypeptique de la caséine sont détectés dans le fromage: l'ornithine et le GABA (gamma-amino-butyrique). Il s'agit sans doute de dérivés de l'acide glutamique et de l'arginine. Certains acides aminés naturellement présents dans la caséine tels l'histidine, l'arginine et la sérine ont, par contre, totalement disparu de la fraction aminée libre.

TABLEAU 57

Composition en certains nutriments de différentes variétés de fromages (pour 100 g de fromage ou en pourcentage de la matière sèche)

Variétés	Protéines *(g)*	Matière grasse		Calcium *(g)*	Phosphore *(g)*	Sodium *(g)*
		(g)	*(%)*			
Parmesan	36,5	26		13,0	8,5	2,1
Emmenthal	27,9	29	45	10,8	8,6	0,6
Tilsit	26,0	27,7	45	8,0	5,3	1,3
Cheddar	25,4	32,4	50	8,0	5,0	1,7
Edam	25,5	26,0	45	7,5	4,5	2,1
Gouda	25,4	29,0	45	8,2	4,4	2,1
Butter cheese	21,1	29,0	50	6,9	4,2	
Bleu	22,4	29,0	50	7,0	4,9	
Brie	22,4	23,0	50	4,0	4,0	2,1
Camembert	22,0	22,3	45	4,0	4,0	1,6
Limbourg	22,4	19,7	40	5,7	3,0	
Romadour	23,2		30	5,1	3,0	
Fêta	17,8	18,8	40	6,5	4,0	46
Cottage cheese	14,7	4,6	20	0,8	1,6	0,8
Fromage blanc	11,8	11,8	40	0,7	1,5	
Fromage maigre	16,3			0,9	1,9	

Source: Renner, 1983.

La teneur en ammoniac de la fraction soluble peut varier selon les fromages du simple au double (gruyère 13 pour cent, camembert 25 pour cent). La fabrication du fromage induit la transformation des acides aminés en amines (histamine) (tableau 58). L'intensité de cette réaction varie selon le degré de maturation et la nature de la flore microbienne. Les concentrations mesurées peuvent atteindre pour l'histamine 1 300 μg/kg. Le taux du lait varie de 0,0 à 1,1 μg/litre. Ces substances peuvent exercer une influence sur la santé (augmentation ou diminution de la pression artérielle) et même induire des migraines.

Les composants azotés libres ne déterminent pas l'arôme du fromage,

TABLEAU 58

Teneurs en tyramine et histamine de différentes variétés de fromages

Variétés	Teneurs *(mg/100 g)*	
	Tyramine	Histamine
Cheddar	35-109	4-27
Emmenthal, gruyère	3-73	1-94
Bleu	7-50	1-8
Edam, gouda	0-60	0-90
Camembert, brie	<2-43	2-40

Source: Renner, 1986.

mais lui impriment plutôt sa saveur, voire son arrière-goût. Le goût amer est dû à certains peptides.

Valeur nutritionnelle des composés azotés du fromage. La qualité nutritionnelle des fromages émane de leur teneur élevée en protéines riches en acides aminés essentiels, c'est-à-dire de haute valeur biologique. Comme pour le lait, les acides aminés limitants sont les composés soufrés, surtout dans certains fromages à pâte molle.

Lors de la fabrication, c'est essentiellement la caséine qui constitue le fromage, tandis que les protéines solubles de bonne qualité nutritionnelle restent dans le lactosérum. C'est pourquoi la valeur biologique des protéines fromagères est quelque peu inférieure à celle des produits laitiers, mais supérieure à celle de la caséine isolée. La transformation du lait en fromage (présure et autres enzymes, acidification) n'altère pas la qualité nutritive des protéines. La durée du processus (de 3 à 5 mois) n'influence pas davantage l'utilisation protéique nette des substances peptidiques et azotées.

En termes métaboliques, on peut assimiler la maturation du fromage à une protéolyse intestinale partielle avant la lettre au cours de laquelle la digestibilité protéique est accrue. Celle-ci peut être proche de 100 pour cent pour une variété de produits; le degré d'utilisation biologique des acides aminés essentiels des fromages est élevé (89 pour cent), plus que celui du lait (de 85 à 86 pour cent) et proche de celui de l'œuf (presque 90 pour cent).

Effets de la transformation des graisses

La teneur lipidique du lait destiné à la production fromagère conditionne très largement les taux de matière grasse du produit fini. L'acceptabilité des fromages gras est habituellement supérieure, car leur haute teneur lipidique leur imprime une saveur plus appréciée. Certains arômes ne se développent que si la proportion de matière grasse est suffisante (au moins 40 à 50 pour cent), sans quoi les produits de dégradation lipidiques odorants ne se forment pas. Ce sont surtout les acides gras volatiles (C2, C4, C6 et C8) qui donnent au fromage son odeur. Certains acides gras branchés ou à nombre impair de carbones (produits par la dégradation de certains acides aminés) ou l'acide acétique (obtenu de la transformation du lactose) sont aussi responsables de l'odeur, et donc de l'acceptabilité du fromage. Le stockage s'accompagne souvent d'une augmentation de la teneur en composés aromatiques, conditionnant par là son attrait pour le consommateur.

La lipolyse est entamée par les lipases microbiennes (la pasteurisation a complètement détruit les lipases endogènes du lait). Le fromage contient de 4 à 22 pour cent de diglycérides, de 0,5 à 2 pour cent de monoglycérides et des acides gras libres (de 1 à 2 g/kg de produit et jusqu'à 5 g/kg pour un fromage fait, voire 11 g/kg pour un fromage odorant). La composition en acides gras (au contraire de la composition aminée) est peu modifiée par la lipolyse. Enfin, la digestibilité des graisses fromagères est bonne (de 88 à 94 pour cent).

Minéraux

Les éléments minéraux des fromages représentent les facteurs nutritionnels les plus intéressants (tableau 59). Le calcium et le phosphore s'y retrouvent en quantités supérieures à celles du lait: jusqu'à dix fois plus pour les fromages à pâte dure et encore quatre à cinq fois pour les pâtes molles. Seuls les fromages frais et le cottage cheese n'en contiennent «que» des quantités équivalentes à celles du lait.

Les fromages les plus gras contiennent relativement moins de calcium et de phosphore. Le lait présuré donne un fromage plus riche en calcium que le lait acidifié. Les deux tiers environ du calcium et la moitié du phosphore du lait accompagnent le caillé dans la formation fromagère. Une partie du

TABLEAU 59

Teneurs en minéraux et en oligo-éléments de différentes variétés de fromages (mg/100 g de produit)

Eléments	Parmesan	Edam, gouda	Cheddar	Gruyère	Roquefort, bleu	Camembert, brie	Crème	Cottage cheese
Minéraux								
Calcium	1200	750	750	1000	650	400	95	65
Magnésium	45	35	30	45	30	20	8	6
Sodium	1110	900	650	500	1300	1000	320	420
Potassium	120	120	100	90	90	130	130	70
Phosphore	800	500	500	600	390	300	110	150
Oligo-éléments								
Fer	1	0,4	0,5	0,3	0,1	0,2-0,8	0,1	0,1
Zinc	4	3	3	2	2	3	0,6	0,5
Cuivre	0,3	<0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1-0,6	0,1	<0,1

phosphore (un cinquième) se maintient dans la phase soluble du fromage et sa teneur augmente lors de la maturation. Seuls les fromages fondus additionnés de phosphates et quelques rares pâtes fraîches contiennent plus de phosphore que de calcium. Enfin, le rapport calcium/phosphore du fromage est élevé et donc satisfaisant au plan nutritionnel.

Cent grammes de fromage à pâte molle ou à pâte dure permettent de couvrir les besoins en protéines à concurrence respectivement de 12-20 pour cent et 40-50 pour cent et les besoins en calcium à concurrence de 30-40 pour cent et 100 pour cent.

Les taux de magnésium varient d'un fromage à l'autre, comme ceux du calcium. Cependant, les oscillations sont moindres en amplitude: cinq fois plus de magnésium dans les fromages à pâte dure que dans le lait, et seulement deux à trois fois plus dans les fromages à pâte molle.

Quant au sodium, sa teneur peut varier fort d'un produit fromager à l'autre (de 0,4 à 4,6 g/100 g). Cette variabilité s'explique par l'inconstance d'une addition de sodium (salage). Dans certains pays (Iran, Turquie), le sel ajouté représente jusqu'à 10 pour cent du poids du produit fini. Lors de l'égouttage, le potassium et le magnésium sont en majorité éliminés avec le sérum.

Le taux d'oligo-éléments varie aussi fortement dans le fromage, d'autant plus que la fabrication se déroule dans des récipients contaminants (chaudrons de cuivre) (tableau 59). Le premier emmenthal d'une fabrication quotidienne contient jusqu'à 2,9 mg de cuivre par 100 g de pâte. Les fromages ultérieurs n'en présentent que 0,5 à 0,8 mg. A titre de comparaison, un emmenthal fabriqué en cuve d'acier inoxydable contient en moyenne 0,16 mg de l'oligo-élément. Le taux de cuivre est contrôlé en raison de son rôle dans la destruction de l'acide ascorbique et dans la fermentation propionique. Le taux de zinc est voisin de celui du lait dans les fromages frais, mais beaucoup plus élevé dans les fromages à pâte dure.

Influence de la présence résiduelle de glucides

Les fromages affinés ne contiennent en général pas de glucides; la petite quantité de lactose restant dans le caillé en fin d'égouttage est transformée en acide lactique au cours de l'affinage. Cependant, dans les fromages frais, peu égouttés et peu fermentés, on trouve des quantités appréciables de

lactose, d'acides lactique et citrique. Il en est de même dans les fromages fondus additionnés de lactose et d'acide citrique au cours de la fabrication. La présence, surtout du lactose pose parfois problème aux sujets lactase-déficients.

Impacts technologiques sur le constituant vitaminique

Les taux de vitamines liposolubles (tableau 60) dépendent de la richesse du lait en matière grasse. Ainsi, 85 pour cent environ de la vitamine A laitière passe dans le fromage. Il n'en va pas de même des vitamines hydrosolubles. La perte des vitamines B entraînées dans le lactosérum peut atteindre 90 pour cent. Le degré de récupération dans le fromage des vitamines du lait est de:

- de 10 à 20 pour cent pour la thiamine, les acides nicotinique, folique et ascorbique;
- de 20 à 30 pour cent pour la riboflavine;
- de 30 à 45 pour cent pour la pyridoxine et l'acide pantothénique;
- de 40 à 60 pour cent pour la cobalamine.

Le résidu vitaminique est perdu avec le lactosérum. Au plan nutritionnel, les teneurs en vitamines se maintiennent à des taux suffisamment élevés pour faire du fromage un aliment digne d'intérêt à ce propos. A noter que les croûtes des fromages à pâte molle et des bleus contiennent davantage de vitamines que le centre de la pâte. En cours de conservation, les concentrations en vitamine B varient sensiblement. Les moisissures synthétisent et consomment certaines vitamines de ce groupe, mais, globalement, leur présence a plutôt un effet enrichissant. Par exemple, l'addition de propionibactérium dans la fabrication de l'edam permet de doubler sa teneur en vitamine B_{12} (figure 19).

Nitrites

Une addition maximale de 20 g de nitrate de sodium ou de potassium est autorisée pour empêcher le développement de spores anaérobies (*Clostridium tyrobutyricum*) dans le lait destiné à la production fromagère. Les nitrates sont réduits en nitrites inhibant le développement microbien. Ces nitrites sont en soi toxiques pour l'être humain, mais, *de facto*, ils sont eux-

TABLEAU 60

Teneurs en vitamines de différentes variétés de fromages (µg/100 g de produit)

Vitamines	Parmesan	Edam, gouda	Cheddar	Gruyère	Roquefort, bleu	Camembert, brie	Crème	Cottage cheese
A	188-360	150-250	300-440	370	310	240-350	225-440	45
D	0,3	0,2	0,3	-	-	0,2	0,3	-
E	-	500	500	-	550	-	-	80
B_1	19-45	28-57	18-40	30-60	40-43	37-50	17-56	21-35
B_2	390-690	190-400	380-520	280-390	590-650	340-670	160-290	170-260
B_6	91-130	69-81	55-130	81-110	90-120	150-280	47-74	68-76
B_{12}	1,5-1,9	1,4-2,0	0,9-1,5	1,6	0,4-0,6	1,1-3,1	0,3-0,7	0,6-0,7
Acide nicotinique	120-320	60-81	39-110	40-110	570-740	480-1570	68-140	130-140
Acide pentothénique	300-530	300-350	290-410	350-560	500-1730	360-1400	270-550	220-40
Biotine	1,7-3,3	1,4-1,6	1,7-3,2	1,5	2,3	2,8-6,6	1,9-5,5	3,0
Folates	8-20	19-42	16-42	10-12	45-49	56-100	13-18	12-13

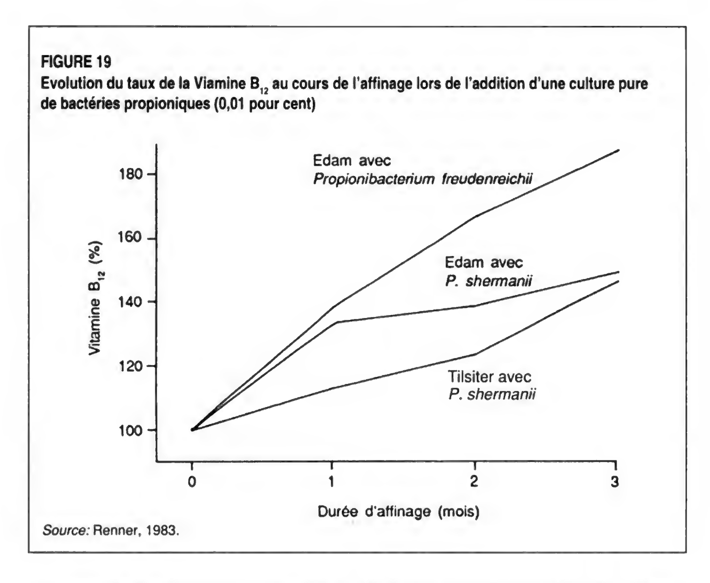


FIGURE 19
Evolution du taux de la Viamine B_{12} au cours de l'affinage lors de l'addition d'une culture pure de bactéries propioniques (0,01 pour cent)

Source: Renner, 1983.

mêmes détruits lors de la maturation du fromage (affinage). De fait, on en retrouve moins de 2 ppm.

Quant au nitrate résiduel du fromage, sa teneur est basse et souvent plus en relation avec la teneur des eaux de fabrication que de la matière première. Ces teneurs de nitrates et nitrites des fromages ne présentent pas, à proprement parler, un risque pour la santé et restent bien en deçà des seuils de consommation quotidiens fixés respectivement par la FAO et l'OMS à 5 mg/kg/jour (nitrates) ou 0,2 mg/kg/jour (nitrites).

La part des produits laitiers dans la consommation ordinaire de nitrate (estimée entre 50 et 100 mg selon les pays) est faible (moins de 1 pour cent) en comparaison de celle des légumes (de 70 à 80 pour cent).

Nitrosamines

Les fromages riches en nitrites et amines ne favorisent pas réellement la

formation de nitrosamines en raison d'un pH trop élevé. Leurs taux sont néanmoins surveillés en raison du pouvoir cancérigène de ces substances.

Valeur nutritionnelle du fromage frais

Le lait destiné à la production du fromage blanc subit de nos jours un chauffage intense (10 minutes à 95 °C), d'où la formation d'un complexe caséines-protéines solubles qui, lors de l'acidification, précipite, de sorte qu'une forte proportion de protéines sériques est entraînée avec la caséine et forme le fromage blanc. La fraction précipitée du lait (qui est d'ordinaire de 78 pour cent) passe donc à 88-89 pour cent de l'azote total; ainsi, 90 pour cent de la ß-lactoglobuline et 60 pour cent de l'α-lactalbumine se retrouvent dans le fromage blanc. Ce dérivé lacté présente une valeur biologique et nutritionnelle plus élevée, en raison d'un taux plus favorable en acides aminés essentiels et notamment en acides aminés soufrés.

Chapitre 7
Lactosérum

INTRODUCTION

Les quantités de lactosérum disponibles dans le monde sont considérables puisqu'elles représentent au moins 85 pour cent du lait transformé en fromage. La composition de ce dérivé de l'industrie laitière varie avec la fabrication dont il provient.

On distingue généralement deux catégories de sérum, selon que son acidité est inférieure ou supérieure à 1,8 g d'acide lactique par litre:

- le lactosérum doux issu de la fabrication de fromage à pâte pressée cuite ou non cuite (emmenthal, saint-paulin, etc.),
- le lactosérum acide issu des autres fromages obtenus par coagulation mixte ou lactique (pâtes molles, pâtes fraîches).

D'une façon générale, les sérums acides contiennent moins de lactose et davantage de minéraux, notamment de calcium et de phosphore, du fait de la déminéralisation de la micelle de caséine. Les protéines sont constituées principalement de protéines solubles; dans les fabrications supportant des températures élevées de pasteurisation, leur teneur diminue.

Dès son élimination du caillé, le sérum ensemencé en bactéries lactiques et autres micro-organismes et à pH et à température favorables à leur développement s'altère rapidement. Pour le conserver, il convient de le traiter sans délais en le refroidissant vers 5 à 8 °C après, si possible, pasteurisation.

Il faut souligner les excellentes propriétés fonctionnelles des protéines de sérum: solubilité, capacité à absorber et à fixer l'eau, gélification, propriétés émulsifiantes et moussantes. Par contre, sa teneur relativement élevée en matières salines est plutôt un inconvénient. Il existe de nombreuses utilisations possibles du sérum dans l'alimentation humaine et animale, mais sa

forte teneur en eau (94 pour cent), sa salinité élevée et son altérabilité, rendent souvent difficiles sa valorisation.

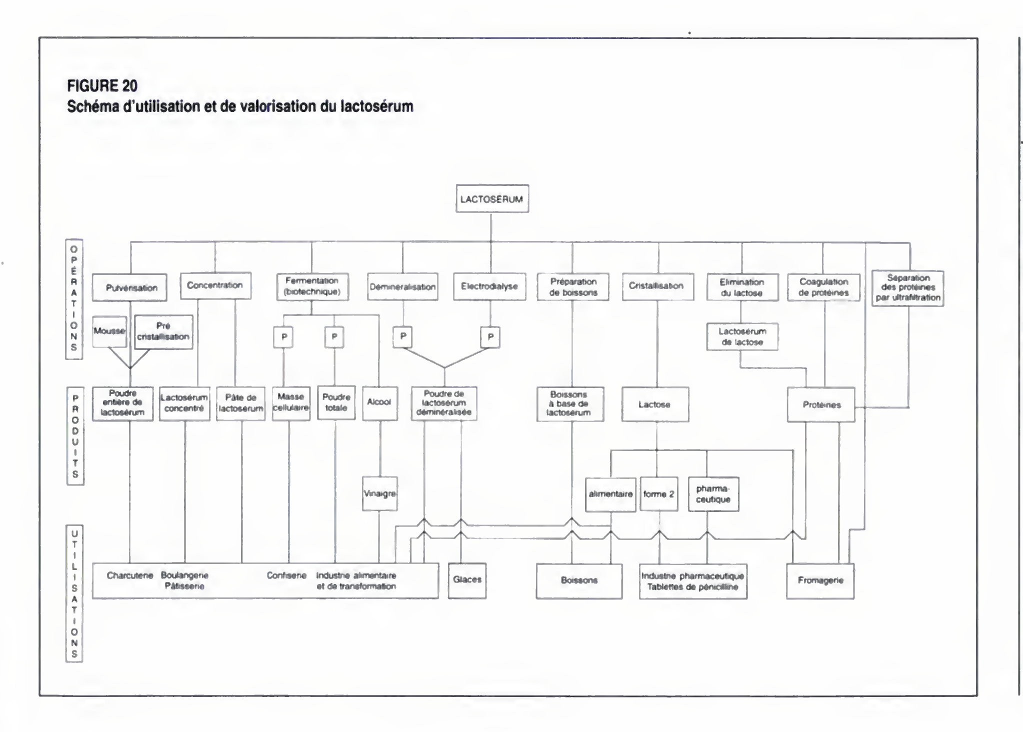
Dans certains grands pays laitiers industrialisés, l'accroissement considérable des quantités de fromages fabriqués par unité de production ne permettent plus d'éliminer le sérum directement, soit par une consommation animale proche (porcheries), soit par déversement dans les cours d'eau, où il serait à l'origine de pollution grave due à la fermentation de ses matières organiques (lactose et matières azotées) et à la diminution de la teneur en oxygène dissous de l'eau au-dessous d'un seuil acceptable. La DBO (demande biologique d'oxygène) du sérum est de 40 000, c'est-à-dire qu'un litre de sérum nécessite 40 g d'oxygène pour que ses matières organiques soient détruites par oxydation microbienne. Dans ces conditions, il est devenu indispensable de le traiter de sorte qu'il ne constitue plus une matière gravement polluante. Encore faut-il que son traitement soit économiquement acceptable.

Avant toute utilisation, le sérum est généralement filtré et centrifugé afin de récupérer les particules de caillé et la matière grasse. Les méthodes de traitement du sérum sont variées et permettent d'obtenir de nombreux produits (figure 20).

Le sérum, déminéralisé ou non, est concentré puis éventuellement séché sur rouleaux ou par le procédé spray. La concentration avant séchage permet, outre une économie d'énergie, la cristallisation du lactose sous forme α-monohydratée et ainsi l'obtention d'une poudre non hygroscopique et peu collante. Selon la qualité du sérum mis en œuvre, il existe différentes variétés de concentrés ou de poudres: produits de sérum doux, de sérum acide, de sérum déminéralisé et de sérum délactosé. D'une façon générale, les sérums doux sont plus faciles à sécher, de meilleure qualité et offrent plus de débouchés.

Les poudres sont principalement utilisées dans les aliments d'allaitement pour veaux. Elles sont également employées, de même que les concentrés liquides, en mélange avec d'autres aliments (hachis de paille, drêches de brasserie, farines), pour divers animaux d'élevage (bovins, porcins, volailles). En alimentation humaine, les sérums concentrés et en poudre ont des applications dans les produits à base de céréales, où ils agissent à la fois

FIGURE 20
Schéma d'utilisation et de valorisation du lactosérum



comme renforçateur des farines et améliorateur de goût et de couleur. Moins coûteux que la poudre de lait, ils tendent à la remplacer au moins en partie.

Les sérums concentrés et en poudre sont aussi utilisés en mélange avec de la crème ou de la matière grasse butyrique ou végétale, des protéines et additifs divers (stabilisants, sucre, sel, arômes, etc.) pour préparer divers produits crémeux, pâteux ou à tartiner. Des mélanges de poudre ou de concentré de sérum et de protéines de soja, aromatisés, colorés et texturés, permettent la préparation de produits stables, non gras, rappelant la viande.

PROTÉINES DE LACTOSÉRUM

Bien qu'en faible quantité dans le sérum, où elles ne représentent qu'environ 13 pour cent de sa matière sèche, leur extraction présente beaucoup d'intérêt en raison de leur grande valeur nutritionnelle et notamment de leur utilisation possible dans les domaines diététiques et thérapeutiques. De plus, grâce à leurs remarquables propriétés fonctionnelles, elles ont un grand nombre de rôles spécifiques dans la texture de préparations alimentaires.

Il existe diverses techniques d'extraction. Le procédé le plus ancien est la thermocoagulation. Le plus simple consiste à porter à ébullition du lactosérum acidifié à pH 4,6-4,7. Dès 63 °C, les protéines commencent à floculer; la précipitation est totale peu après l'ébullition. Leur récupération se fait par filtration ou décantation. Ce produit, pressé pendant 24 heures, donne un fromage connu depuis très longtemps. On peut aussi en faire un «lait de protéines» qui est réincorporé au lait de fromagerie. Ce procédé ne modifie pas la valeur nutritionnelle des protéines mais modifie défavorablement leurs propriétés fonctionnelles. Aussi semble-t-il préférable de recourir aux procédés modernes que sont l'ultrafiltration et les échangeurs d'ions.

LACTOSE

La fabrication du lactose se fait par évaporation du lactosérum, après extraction éventuelle de la matière grasse, des protéines et des sels minéraux, puis par cristallisation du lactose, séparation et séchage des cristaux. Il existe deux qualités principales de lactose:

- le lactose alimentaire à 99 pour cent minimum de lactose;
- le lactose pharmaceutique (Codex) à 99,8 pour cent minimum de lactose.

Lactose hydrolysé

L'hydrolyse est généralement réalisée par voie enzymatique à l'aide de lactases. Elle se fait soit par l'enzyme libre, soit par l'enzyme immobilisée. Après hydrolyse du lactose, son pouvoir sucrant est environ quatre fois plus élevé.

VALEUR NUTRITIONNELLE DU LACTOSÉRUM

Usage alimentaire du lactosérum

La qualité nutritive du lactosérum tient à la fois à la présence du lactose et des protéines sériques. La richesse en lactose en fait un auxiliaire actif dans le brunissement enzymatique ou maillardisation apprécié en boulangerie, biscuiterie et viennoiserie.

Les propriétés fonctionnelles liées aux protéines sériques en font des produits intéressants à la fois pour l'alimentation du bétail, mais aussi en nutrition humaine.

Ces protéines sont utilisées en alimentation infantile pour leurs qualités nutritionnelles (richesse en acides aminés essentiels), pour la préparation de plats cuisinés (rétention d'eau), pour leur solubilité à toute échelle de pH (boissons au lait, limonaderie) et pour leur pouvoir moussant (confiserie, nougaterie).

Elles sont également employées dans bien d'autres opérations de l'industrie agro-alimentaire, telles que la fabrication des potages en poudre, des fromages fondus, des crèmes glacées, des mousses de foie et la panification. Enfin, les protéines sériques conviennent particulièrement au développement des levures.

Il convient de noter la présence de diverses vitamines hydrosolubles dans le lactosérum. Le lactosérum récupéré pour la nutrition humaine ou animale provient pour l'essentiel de la fabrication fromagère. La composition donnée au tableau 61 est à titre indicatif, compte tenu de la diversité des fabrications fromagères, notamment de celles issues de coagulation mixte et acide. Au cours du stockage du lactosérum à température ambiante, les vitamines ne sont pas détruites et la teneur en lysine n'augmente quasiment pas, témoins d'une bonne stabilité du produit.

TABLEAU 61

Composition moyenne du lactosérum

Composants	Unités	Lactosérum par litre	Lactosérum par kg
Matières sèches	g	61	
Humidité	g		44
Lactose	g	48-42	740-660
Protéines	g	8	125
Graisses	g	2	10
Minéraux	g	5-7	80-105
Acide lactique	g	1-5	2-42
Calcium	g	0,5-1,0	7-20
Phosphore	g	0,5	8
Potassium	g	1,4	20
Sodium	g	0,45	9
Chlore	g	1,0	16
Magnésium	g	0,04-0,08	1-2
Zinc	mg	0,3-2,3	10-60
Fer	mg	0,9	
Cuivre	mg	0,2	3
Manganèse	µg	6-26	120-470
Thiamine	mg	0,4	5
Riboflavine	mg	1,4	25
Pyridoxine	mg	0,5	
Cobalamine	µg	1,5	25
Acide nicotinique	mg	2	8
Acide folique	µg	50	220
Acide pantothénique	mg	–	115
Acide ascorbique	mg	9	45
pH		6,0-4,5	

Note: Lorsque deux chiffres sont donnés, le chiffre de gauche correspond au lactosérum doux et celui de droite au lactosérum acide.

Impact des traitements particuliers sur la valeur nutritionnelle du lactosérum obtenu

Dessiccation (séchage). Le séchage du lactosérum par pulvérisation (spray) pour en faire de la poudre n'altère pas le produit alors que le passage sur rouleau est plus délétère.

Coagulation. Les protéines sériques coagulées à la chaleur sont en fait des composés hétérogènes contenant principalement des protéines (88 pour cent) mais aussi des matières grasses (4,5 pour cent), du lactose (0,2 pour cent) et des cendres (4 pour cent). En outre, leur digestibilité est proche de 100 pour cent, c'est-à-dire meilleure que celle des protéines sériques elles-mêmes.

Ultrafiltration. Les procédés d'ultracentrifugation permettent de pousser plus ou moins loin la séparation entre nutriments. On peut obtenir une matière sèche de concentration très variable (de 12 à 70 pour cent); simultanément, la teneur en lactose peut être abaissée de 70 à 20 pour cent environ et celle de matière minérale de 10 à 4 pour cent.

Les concentrés de protéines sériques trouvent un usage particulièrement adapté en alimentation infantile. Toutefois, comme la teneur en minéraux augmente au cours de l'ultrafiltration avec la concentration protéique, une déminéralisation supplémentaire (par électrodialyse) est nécessaire avant d'en faire des produits adaptés à la consommation infantile. De même, les vitamines fortement liées aux protéines (cobalamine et acide folique) se retrouvent intégralement ou presque dans l'ultrafiltrat alors que les autres vitamines du groupe B ne se maintiennent qu'à des concentrations variant de 60 à 70 pour cent de leur valeur initiale. La vitamine C ne conserve que de 15 à 20 pour cent à peine de sa valeur de départ. Un réajustement vitaminique est dès lors nécessaire, selon l'usage ultérieur qui sera fait de ces produits.

Osmose inverse. L'osmose inverse ne devrait débarrasser le lactosérum que de son eau. Dans la réalité, il subit une légère perte de tous les minéraux.

TABLEAU 62
Composition moyenne de différents produits protéinés du lait (%)

Composants	Caséines	Coprécipités	Concentrés de lactosérum	
			Faible	Fort
Humidité	4,5	6,0	4	4
Protéines	90	82,5	40	70
Lactose	0,3	0,8	46	18
Graisses	1,2	1,2	4	5
Cendres	4,1	9,5	5	4
Sodium	0,1	2,2	0,4	0,3
Potassium	0,1	0,1	1,2	1,0
Calcium	0,1	2,0	0,7	0,5

Intérêt nutritionnel des sous-produits du lactosérum ou de produits combinés

Utilisation des constituants du lactosérum. On peut modifier certaines fractions du lactosérum de manière à obtenir des coprécipités (96 pour cent de la caséine sont entraînés avec 70 pour cent des protéines sériques), des protéines sériques coagulées à la chaleur ou encore des protéines sériques concentrées obtenues par ultracentrifugation (tableau 62).

Les coprécipités possèdent un profil en acides aminés comparable à celui des protéines entières du lait. Quand du calcium est employé pour entraîner les constituants azotés dans la coprécipitation, des produits riches en calcium sont alors extraits. Ces produits servent à améliorer la teneur protéique du yaourt, du kéfir, mais aussi des biscuits, des produits de boulangerie, de la pâtisserie, des puddings, des crèmes glacées, etc.

Les protéines coagulées à la chaleur trouvent leur meilleure application comme produit d'addition: on en ajoute aux fromages blancs, aux yaourts et toutes sortes de produits laitiers fermentés, aux fromages, aux crèmes glacées et aux pâtisseries.

Les produits d'ultracentrifugation sont surtout utilisés en diététique infantile. En effet, la valeur biologique de ces lactoprotéines sériques

concentrées équivaut à celle des protéines solubles originales et la biodisponibilité de la lysine n'est pas entamée par ce procédé. Les résidus de l'ultracentrifugation contiennent surtout du lactose, de l'azote non protéique et des minéraux. La récupération de ces résidus passe par l'hydrolyse du lactose pour obtenir une matière sirupeuse (mélange de glucose et de galactose au pouvoir sucrant quatre à cinq fois supérieur).

D'une manière générale, la bonne qualité du lactosérum en fait un produit d'addition particulièrement approprié pour enrichir les aliments ou les régimes pauvres en protéines. En pathologie, on pense particulièrement à l'alimentation des diabétiques, des malades hépatiques ou des sujets souffrant de malnutrition. En alimentation de soutien, on pense aux sportifs, aux personnes âgées ainsi qu'à certaines catégories d'enfants. Le pain additionné de lactosérum voit ses qualités nutritionnelles améliorées, mais les produits laitiers eux-mêmes (fromages, etc.) peuvent aussi bénéficier d'un apport de telles protéines. Les régimes riches en aliments d'origine végétale se trouvent aussi notablement améliorés lorsque des protéines lactées sériques y sont ajoutées. Cet avantage est particulièrement intéressant pour les pays en développement, puisque les protéines sériques se prêtent bien au mélange avec d'autres aliments, et notamment à la cuisson en remplacement de l'œuf.

Fromages riches ou enrichis en lactoprotéines. On peut, par ultrafiltration du lait de fromagerie, obtenir une matière sèche de telle manière que le lactosérum ne soit pas perdu lors de la fabrication du fromage. Ainsi, toutes les protéines sériques restent dans le fromage qui en contient dès lors 15 pour cent environ au lieu de 2 à 3 pour cent.

De même, les teneurs en calcium et phosphore sont plus élevées et celles de sodium et potassium légèrement plus faibles. Lors de la protéolyse enzymatique, les protéines solubles résistent mieux que la caséine: les teneurs en acides aminés libres et en composés azotés solubles seront relativement plus basses. On peut même enrichir la matière sèche fromagère en protéines solubles. Dans ce cas, la teneur protéique sérique relative peut atteindre 35 pour cent.

Usage alimentaire des autres constituants du lactosérum

Lactose. En raison de ses propriétés,le lactose a de nombreuses utilisations: en diététique; en industrie pharmaceutique comme diluant, excipient ou milieu de fermentation; en industrie alimentaire, notamment en charcuterie comme substrat de culture pour les bactéries lactiques; en confiserie, boulangerie, biscuiterie et pâtisserie; dans la fabrication des chips et pommes de terre frites pour favoriser les réactions de brunissement et de caramélisation, ou encore comme charge glucidique à faible caractère sucré (sept fois moins sucrant que le saccharose). Il est aussi utilisé comme fixateur d'arômes, absorbeur de pigments et pour son pouvoir émulsifiant, son aptitude au séchage et à la compression.

Lactose hydrolysé. L'hydrolyse du lactose (dédoublement en glucose et en galactose) ouvre de nouveaux et intéressants débouchés au lactosérum déminéralisé, notamment dans les desserts, les fabrications sucrées à base de farine, la confiserie, les crèmes glacées, la biscotterie, la biscuiterie, ainsi que dans l'alimentation animale. Toutefois, certains pays font encore des réserves sur son emploi considérant que l'innocuité du galactose n'est pas pleinement démontrée.

Chapitre 8
Matière grasse

INTRODUCTION

Pendant longtemps, l'utilisation de la matière grasse butyrique est restée limitée à la fabrication de la crème, du beurre et de quelques produits dérivés. Vers le milieu du XX[e] siècle, sous l'évolution des besoins, des techniques et des réglementations, de nouveaux produits sont apparus: huile de beurre, beurre allégé, spécialités à tartiner additionnées ou non de matière grasse d'origine non laitière, etc.

ÉCRÉMAGE

Quelle que soit l'utilisation de la matière grasse, celle-ci est d'abord séparée du lait au cours de l'opération d'écrémage qui donne deux produits: le lait écrémé et la crème. La crème constitue simplement du lait concentré en matière grasse à environ 10 fois (lait entier: 35 g/kg; crème: 350 g/kg). Son état physique n'est pas modifié de même que la composition du liquide (lait écrémé) dans lequel sont dispersés les globules gras. La concentration en matière grasse est obtenue par écrémage spontané ou centrifuge.

L'écrémage repose sur la différence de masse volumique entre les globules gras (0,93) et la phase aqueuse ou lait écrémé (1,036). L'écrémage spontané est encore utilisé par les éleveurs ou dans les petites fromageries artisanales. Il consiste à abandonner le lait dans un récipient large, en couche mince (de 10 à 15 cm) à une température de 8 à 14 °C. Après un repos de 12 à 24 heures, la crème montée en surface est ramassée à l'aide d'une louche plate. Ce mode d'écrémage est imparfait; dans les meilleures conditions la quantité de matière grasse rassemblée dans la crème ne dépasse pas 80 à 85 pour cent de la matière grasse du lait.

L'écrémage centrifuge est réalisé dans une écrémeuse. L'opération est rapide, continue et assure le passage dans la crème de la quasi-totalité de la

matière grasse. L'écrémeuse comprend un récipient appelé bol, généralement de forme cylindro-conique, tournant à grande vitesse. Le lait entier, porté à la température de 30 à 40 °C, est introduit à la base au centre du bol rotatif. Sous l'action de la force centrifuge, les globules gras se dirigent vers l'axe de rotation et sont entraînés avec une petite quantité de lait vers la sortie de crème; le lait séparé des globules gras, plus lourd, se dirige vers la périphérie du bol d'où il est entraîné vers la sortie du lait écrémé. L'écrémage est facilité par la répartition du lait en couches minces à l'intérieur du bol grâce à la présence d'un empilement de plateaux ou assiettes tronconiques solidaires de l'axe de rotation. La teneur en matière grasse de la crème est réglée en laissant dans celle-ci une quantité de lait écrémé plus ou moins importante. L'écrémage centrifuge provoque une épuration du lait en entraînant les impuretés lourdes sur les parois du bol où elles forment les «boues» d'écrémeuse. Il existe plusieurs modèles d'écrémeuse. Les machines modernes permettent un écrémage très poussé (matière grasse du lait écrémé <0,5 g/kg), limitent les chocs endommageant les globules gras et évitent la formation de mousses.

On distingue généralement deux catégories de crème:

- crème de consommation, utilisée directement, notamment en cuisine, en pâtisserie, dans la préparation des crèmes glacées, etc.;
- crème de transformation, destinée à la fabrication du beurre et autres produits.

Crèmes de consommation

Il en existe plusieurs formes, variant selon leur teneur en matière grasse, le traitement subi, le mode de conservation et la réglementation propre à chaque pays. On peut cependant distinguer:

- la crème légère ou crème allégée: contenant entre 10 et 20 pour cent de matière grasse: elle est notamment utilisée avec le café, le thé, les fruits en compotes, etc.;
- la crème (normale), contenant au moins 30 pour cent de matière grasse: elle est surtout utilisée dans les préparations culinaires et les pâtisseries. Elle peut être fluide ou épaisse, douce ou maturée. L'épaississement augmente avec la teneur en matière grasse et avec l'acidification. La

maturation due au développement de bactéries lactiques acidifiantes et aromatisantes fait baisser le pH et, à partir de 5,2, provoque la floculation de la caséine. L'acidité d'une crème douce, exprimée en acide lactique pour 1 000 de sa partie non grasse est de l'ordre de 1,5 (15 °Dornic) alors que celle d'une crème maturée est voisine de 8 à 10 (80 à 100 °Dornic);
- les crèmes fouettées: ce sont des crèmes foisonnées par incorporation d'air. Le taux de foisonnement, c'est-à-dire le rapport entre le volume de la crème fouettée et le volume initial ne doit généralement pas dépasser 3,5. Seules les crèmes non maturées conviennent au foisonnement. La crème Chantilly est une crème fouettée sucrée avec au moins 15 pour cent de saccharose;
- les crèmes sous pression: elles sont conditionnées dans des récipients métalliques étanches avec du protoxyde d'azote qui assure leur foisonnement. Les crèmes fouettées ou sous pression peuvent être légères ou contenir plus de 30 pour cent de matière grasse. Leur conservation est assurée par pasteurisation, stérilisation ou congélation.

Le problème de la qualité microbiologique des crèmes se pose comme pour le lait de consommation. Il convient de mettre en œuvre des laits frais et peu pollués et de procéder aux opérations de production de la crème dans d'excellentes conditions d'hygiène. Certains pays ont rendu obligatoire l'assainissement des crèmes par la pasteurisation, qui doit être immédiatement suivie de la réfrigération du produit. On peut aussi stériliser la crème douce par un procédé classique ou par UHT.

Crèmes de transformation et crèmes de beurrerie

Les crèmes destinées à la transformation, notamment à la fabrication du beurre, subissent divers traitements de préparation (cités ci-après). Certains sont facultatifs, mais tous sont destinés à améliorer les conditions technologiques et économiques et la qualité des produits fabriqués.

Normalisation. Elle consiste à régler le taux de matière grasse de la crème selon sa destination. Pour la fabrication traditionnelle du beurre, ce taux est de 35 à 40 pour cent; pour la fabrication continue, il est de 40 à 50 pour cent.

Désacidification. Une crème acide est visqueuse; elle coagule au cours de la pasteurisation provoquant le «gratinage» de l'appareil et un goût de cuit

dans le beurre. Les crèmes fermières collectées par la laiterie ayant souvent fermenté de façon anarchique sont de mauvaise qualité microbiologique et doivent être pasteurisées. Il est alors nécessaire, avant pasteurisation, de ramener l'acidité dans le non-gras entre 15 et 20 °Dornic. On utilise généralement la soude caustique.

Pasteurisation. Ce traitement tend à se généraliser. Il a pour but la destruction des germes pathogènes et de la plus grande partie de la flore banale susceptible de gêner la maturation de la crème par les bactéries lactiques sélectionnées et de nuire à la qualité du beurre; il permet aussi l'inhibition des lipases (facteurs de rancissement) et la formation de produits sulfurés réducteurs (facteurs antioxydants). Il faut mettre en œuvre des températures de 92 à 95 °C pendant 20 à 30 secondes. La pasteurisation est souvent accompagnée d'un dégazage qui permet d'éliminer les saveurs et odeurs dues à des substances volatiles d'origine alimentaire (choux, ail, etc.), fermentaires ou autres. Cette opération se fait par évaporation à chaud sous vide ou à l'air libre en même temps que la réfrigération.

Réfrigération. La crème sortant du pasteurisateur doit être immédiatement refroidie afin d'éviter le développement des germes thermorésistants et l'apparition de défauts de goûts et de mettre celle-ci dans les conditions les plus favorables à sa maturation physique et à sa maturation biologique.

Maturation. Elle a pour but de faire prendre à la crème des caractères physico-chimiques permettant un barattage facile, avec le minimum de pertes en matière grasse et l'obtention d'un beurre de bonne qualité organoleptique concernant notamment sa consistance et sa flaveur.

Maturation physique. Les propriétés de la matière grasse butyrique et, par suite, celles du beurre (notamment sa consistance) dépendent à la fois de la composition des glycérides et des conditions thermiques. La maturation physique a pour but d'amener la matière grasse, compte tenu de sa composition et de l'état de fusion et de solidification de ses constituants, dans un état de cristallisation partielle permettant de conférer au beurre la consistance voulue. Cette maturation est particulièrement importante lorsque la matière grasse a été rendue liquide au cours de la pasteurisation ou de l'écrémage à chaud. Dans ce cas, sa cristallisation n'est complète qu'après un refroidissement vers 6-7 °C. A 13 °C, la matière grasse est partiellement

en surfusion. La température de maturation physique et sa durée demeurent assez empiriques; elles sont à adapter selon la composition glycéridique.

Lorsque la matière grasse est riche en glycérides à haut point de fusion, ce qui donne des beurres durs et cassants, il convient de refroidir rapidement la crème à basse température de façon à obtenir une cristallisation en fins cristaux (par exemple, de 5 à 7 °C pendant 3 à 4 heures). Si, au contraire, elle est riche en glycérides à bas point de fusion (oléine), c'est-à-dire liquide à température ordinaire, ce qui donne des beurres mous, on s'efforcera de provoquer la cristallisation des glycérides à point de fusion élevé (palmitine) sous la forme de gros cristaux de façon à conférer au beurre de la fermeté (par exemple, de 12 à 15 °C pendant quelques heures).

Le souci, dans la maturation, est de parvenir à ajuster le rapport matière grasse solide/matière grasse liquide de sorte que le beurre atteigne la consistance souhaitée. On peut considérer que, dans le cas des beurres ayant une consistance satisfaisante pour être étalés sur du pain, ce rapport est généralement compris entre 22 à 35 pour cent/65 à 78 pour cent.

Maturation biologique. Elle a pour but, d'une part, d'acidifier la crème, ce qui facilite le barattage et limite les pertes de matière grasse dans le babeurre et, d'autre part, de permettre la production de substances aromatiques (diacétyle). Dans le cas des crèmes pasteurisées, elle nécessite l'ensemencement des crèmes avec des ferments lactiques mésophiles acidifiants et aromatisants sélectionnés. Dans le cas des crèmes crues, l'ensemencement en ferments sélectionnés est fortement recommandé de façon à éviter ou à limiter le développement des micro-organismes indésirables. Le taux d'ensemencement est de 1 à 5 pour cent. Il varie, comme la température (de 11 à 20 °C) et la durée de maturation (de 6 à 24 heures), selon l'acidité et l'aromatisation recherchées. Selon les pays, la maturation est plus ou moins poussée; d'une façon générale, on a tendance à la réduire, car une forte acidité (pH du beurre inférieur à 5) favorise l'oxydation et limite ainsi la durée de stockage du beurre.

On classe les beurres en deux catégories:

- beurres de crème maturée, dont le pH est égal ou inférieur à 5;
- beurres de crème douce, dont le pH est supérieur à 5, souvent compris entre 5,5 et 6 et pouvant atteindre 6,7-6,8.

Si un pH bas augmente les risques d'oxydation, un pH élevé, en diminuant la protection acide, accroît les risques d'altérations microbiennes, notamment la lipolyse (rancissement). En conséquence, dans le cas d'une crème pour la fabrication d'un beurre de crème fermentée, destiné à être consommé rapidement, son acidité ou barattage doit se situer entre 65 et 70 °Dornic dans son non-gras alors que, dans le cas d'un beurre destiné au stockage, il faut réduire l'acidité qui ne doit pas dépasser 35 à 50 °Dornic dans le non-gras.

Méthode du Nizo (Pays-Bas)

Cette méthode permet de produire un beurre acide à partir d'une crème douce n'ayant subi qu'une maturation physique (par example, 5 heures à 6 °C). Elle consiste à injecter, lors du malaxage du beurre, un mélange de ferments lactiques et d'un concentré de culture lactique. Le pH est instantanément abaissé à 5,1-5,2 en même temps que se fait un apport de diacétyle. Cette méthode connaît un intéressant développement.

FABRICATION DU BEURRE

Principes

Dans le lait comme dans la crème, la matière grasse se trouve à l'état de globules. Dans le beurre, la matière grasse forme une phase continue emprisonnant à la fois les globules gras restés plus ou moins intacts et des gouttelettes aqueuses. La proportion de matière grasse restée à l'état globulaire varie avec le procédé de fabrication. Elle est d'environ 50 pour cent dans le barattage classique et de 30 à 40 pour cent dans le procédé continu Fritz.

La fabrication du beurre consiste en la destruction de la suspension globulaire et une inversion de phase, accompagnées d'une séparation de la plus grande partie de la phase non grasse (babeurre). Alors que le lait constitue une émulsion du type graisse dans eau, le beurre est une émulsion du type eau dans graisse dont la composition est donnée au tableau 63. Cette opération dite barattage nécessite deux phases distinctes:

- rapprochement des globules gras, obtenu par agitation de la crème;
- mise en liberté de la matière grasse à bas point de fusion (fluide à

TABLEAU 63

Composition du beurre (pour 100 g)

Composants	Valeurs
Eau	16 % maximum
Matière sèche dégraissée (lactose, protéines, minéraux)	2 % maximum
Protéines	0,6 %
Glucides	0,4 %
Lipides	82 %
Cholestérol	220-280 mg
Calcium	16 mg
Carotène	0,3-0,9 mg
Vitamine A	0,4-1,05 mg
Energie	755 kcal = 3 150 kJ

température ambiante) et répartition dans sa masse des glycérides à point de fusion plus élevé (concrets à température ambiantes) et des gouttes de babeurre émulsionnées; cette deuxième phase peut être réalisée par refroidissement ou par agitation.

Le procédé classique repose sur l'agitation de la crème refroidie dans la baratte classique discontinue – dont les formes peuvent être variées (tonneau, cube, etc.), de même que le matériau constitutif (bois, acier inoxydable) – ou dans la baratte continue (système Fritz). L'agitation provoque d'abord la formation de mousse où s'accumulent les globules; elle permet ensuite la libération de la graisse liquide. Lorsqu'il y a soudure entre les globules gras plus ou moins éclatés et que la graisse est libérée, la mousse tombe brusquement avec formation de grains de beurre qui grossissent sous l'action de l'agitation baignant dans un liquide, le babeurre.

Méthode traditionnelle

Les principales conditions du barattage discontinu sont les suivantes:

- Agitation: elle est fonction de la vitesse de rotation de la baratte (de 20 à 50 tours/minute), de son agencement intérieur, de sa forme, et de son

taux de remplissage qui doit être voisin de 40 pour cent de son volume total sans jamais dépasser 50 pour cent.

- Température: elle est habituellement comprise entre 8 et 13 °C. Trop basse, elle risque de donner un beurre qui a tendance à avoir une teneur en eau insuffisante (<16 pour cent). Trop élevée, elle risque de provoquer des pertes excessives de matière grasse dans le babeurre et de donner un beurre mou et trop humide.
- Acidité: elle favorise le barattage en modifiant la couche lécithino-protéique de la membrane globulaire.
- Teneur en matière grasse de la crème: elle est habituellement comprise entre 35 et 40 pour cent.

Après remplissage de la baratte et quelques rotations de celle-ci, on l'ouvre afin d'évacuer les gaz puis on la fait tourner jusqu'au moment où se forment les grains de beurre. L'opération nécessite de 35 à 45 minutes. Dès que le grain commence à se former, la vitre du hublot de la baratte s'éclaircit très rapidement. On arrête le barattage lorsque le grain a atteint approximativement la grosseur d'un grain de blé. On élimine alors le babeurre qui ne doit pas contenir plus de 3 à 4 g de matière grasse par litre.

On procède alors au lavage du beurre à l'aide d'eau fraîche à température égale ou un peu inférieure à celle du grain de façon à le raffermir si nécessaire. Le volume d'eau représente environ les deux tiers du volume de la baratte. L'eau doit être d'excellente qualité microbiologique et chimique et être exempte de fer. Le lavage a pour but de diluer les gouttes de babeurre émulsionnées dans la matière grasse de façon à réduire leur teneur en lactose et protéines; ces substances permettraient le développement de micro-organismes défavorables à la qualité du beurre. Si la crème utilisée est de bonne qualité, il suffit de procéder à un ou deux lavages de 10 minutes environ chacun. On procède ensuite au «ramassage» du grain en présence d'un peu d'eau jusqu'à l'obtention de morceaux de beurre de la dimension du poing. Pour terminer, on effectue le malaxage, qui a pour but de rassembler les morceaux de beurre en une masse homogène, de disperser la phase aqueuse au sein de la phase grasse sous forme de très fines gouttelettes et de régler l'humidité finale du beurre qui, dans la plupart des pays, doit être

au maximum de 16 pour cent. Le malaxage se fait par pétrissage ou par laminage, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de la baratte.

Méthode continue au butyrateur

Lorsque les quantités de beurre à fabriquer sont importantes, on utilise de plus en plus le barattage en continu. Le procédé le plus utilisé dérivé du système Fritz repose sur le même principe que dans la fabrication classique. Il admet les crèmes douces et maturées d'une teneur en matière grasse de 40 à 50 pour cent et met en œuvre une machine (butyrateur) constituée de deux cylindres:

- un cylindre de barattage maintenu vers 9-10 °C à l'intérieur duquel tourne à grande vitesse (de 2 000 à 3 000 tours/minute) un batteur; la formation du grain de beurre se fait instantanément;
- un cylindre de malaxage incliné dans lequel tombe le mélange de grains de beurre et de babeurre; dans ce cylindre tournent lentement et en sens inverse deux vis d'Archimède qui compriment le beurre et le conduisent au travers de filières d'où il sort sous forme d'un ruban pouvant immédiatement aller à l'empaqueteuse. Au cours du malaxage, le beurre peut être salé au sel sec ou en saumure.

Salage du beurre

La salage est le plus ancien procédé de conservation du beurre. Le sel possède un pouvoir antiseptique qui varie selon sa concentration et les espèces microbiennes. Etant soluble dans la phase aqueuse, il y forme une saumure plus ou moins concentrée. Ainsi, dans un beurre salé à 1 pour cent, le taux de sel dans le non-gras est de 6 pour cent, ce qui limite le développement de la flore fongique. Il faut atteindre un salage à 2,5 pour cent, soit 12,5 pour cent dans le non-gras, pour assurer une inhibition quasi totale des micro-organismes.

Le salage atteint parfois des taux très élevés allant jusqu'à 5 pour cent soit 24,7 pour cent dans le non-gras, voire davantage, ce qui est excessif mais masque certaines altérations. A partir de 4 à 5 pour cent, le beurre est pratiquement inconsommable à l'état frais; il est utilisé dans les préparations

culinaires. Dans certains pays, en raison du rôle du sel sur le goût, on procède généralement au salage du beurre à la dose de 0,5 à 1,5 pour cent.

Composition du beurre

Cent grammes de beurre contiennent de 82 à 84 g de matières grasses, de 14 à 16 g d'eau et de 0,4 à 1,8 g de matière sèche dégraissée. La phase grasse est essentiellement constituée de triglycérides (82 pour cent). On trouve en outre des phosphatides (de 0,2 à 1 pour cent), du carotène (de 3 à 9 ppm), de la vitamine A (de 9 à 30 ppm), de la vitamine D (de 0,002 à 0,040 ppm) et de la vitamine E (de 8 à 40 ppm).

L'eau et la matière sèche forment le non-gras. L'eau provient du plasma de la crème et en partie de l'eau ajoutée lors du lavage du beurre. La matière sèche est composée de lactose (de 0,1 à 0,3 pour cent), d'acide lactique (0,15 pour cent dans le beurre de crème acide), de matières azotées (de 0,2 à 0,8 pour cent) dont la caséine (de 0,2 à 0,6 pour cent), la lactalbumine (de 0,1 à 0,05 pour cent), les protéines membranaires, les peptides, les acides aminés (traces). On trouve aussi des sels, autres que le NaCl d'apport (0,1 pour cent), des métaux lourds, dont le cuivre (40 à 300 µg/kg), ainsi que de la vitamine C (3 ppm) et B_2 (0,8 ppm). La teneur en air du beurre varie de 0,5 à 10 ml pour 100 g selon le procédé de fabrication.

PRODUITS DÉSHYDRATÉS

Ce sont des produits obtenus à partir de lait, de crème ou de beurre dont on a extrait la quasi-totalité du non-gras (eau + matière sèche dégraissée). On distingue plusieurs produits selon leur niveau de pureté:

- matière grasse laitière anhydre (MGLA);
- matière grasse butyrique anhydre ou huile de beurre anhydre (MGBA);
- matière grasse butyrique ou huile de beurre (MGB).

Il faut ajouter le ghee, produit notamment en Asie du Sud, en particulier dans la péninsule indienne, qui peut être préparé à l'aide du lait de différentes espèces animales et s'apparente au beurre fondu produit dans les campagnes.

Pour être conformes à la norme internationale (norme n° A-2, 1973) du

Codex Alimentarius, les produits déshydratés doivent présenter les caractéristiques suivantes:

- Teneur minimale en matière grasse:

MGLA et MGBA	99,8 pour cent
MGB	99,3 pour cent
Ghee	99,6 pour cent

- Teneur maximale en eau:

MGLA et MGBA	0,1 pour cent
MGB	0,5 pour cent
Ghee	0,3 pour cent

- Teneur maximale en peroxydes (mEq d'oxygène par kg de matière grasse):

MGLA	0,2
MGBA	0,3
MGB	0,8
Ghee	0,8

- Goût et odeur:

MGLA	purs et neutres
MGBA	pas de goût ou odeur prononcé, impur ou désagréable
MGB	aucun goût ou odeur trop prononcé, impur ou désagréable
Ghee	pas de goût ou odeur désagréable le rendant impropre à la consommation

- Substances neutralisantes:

MGLA:	absence
Autres produits:	traces

- Structure physique: lisse et à fine granulation.

Dans tous les cas, la teneur en cuivre ne doit pas dépasser 0,05 mg/kg et celle en fer 0,2 mg/kg. Enfin, la teneur minimale en antioxygènes (toute combinaison de gallate de propyle, d'octyle et de dodécyle avec du buthylhydroxyanysol [BHA] ou du buthylhydroxytoluène [BHT] ou ces deux substances) dans les produits qui ne sont pas destinés à être consommés directement ou à être utilisés dans du lait recombiné ou des produits laitiers

recombinés a été fixée à 200 mg/kg, mais les gallates ne doivent pas dépasser la proportion de 100 mg/kg.

Procédés de fabrication

Le procédé indirect consiste à faire fondre du beurre à une température maximale de 80 °C. Le produit subit ensuite une double centrifugation, puis est traité dans un évaporateur pour compléter l'extraction d'eau. On peut aussi, après la fonte du beurre, procéder à la séparation à chaud du non-gras par décantation statique, mais la teneur en matière grasse ne dépasse guère 95 pour cent alors qu'elle atteint 99 pour cent par centrifugation. L'huile est ensuite refroidie vers 30 °C et conditionnée en fûts métalliques de diverses capacités (de 1 à 200 kg). Afin de limiter les risques d'oxydation, la conservation se fait généralement sous azote.

Dans le procédé direct, on part d'une crème à 35-45 pour cent de matière grasse que l'on centrifuge vers 60 °C de façon à obtenir une crème concentrée à 75-80 pour cent ou plus de matière grasse. Celle-ci constitue une émulsion peu stable du fait de la grande proximité des globules entre eux. La déstabilisation est réalisée par un traitement mécanique tel que l'homogénéisation. L'huile de beurre obtenue est chauffée vers 90 °C, puis déshydratée par centrifugation et/ou évaporation.

Ces produits ont l'avantage de se conserver plus facilement que le beurre du fait de leur très faible teneur en eau. Toutefois, ils peuvent lentement s'oxyder, notamment quand ils proviennent de matière première de mauvaise qualité. A température ambiante, il convient de les utiliser dans les 12 mois suivant leur fabrication; à température inférieure à +10 °C, ils peuvent se conserver environ 24 mois. Ces produits trouvent une utilisation importante dans la préparation du lait et des produits laitiers recombinés, ainsi que dans la plupart des préparations alimentaires industrielles ou domestiques utilisant le beurre ou d'autres matières grasses.

Parmi les produits déshydratés, il faut encore citer le beurre en poudre dans lequel, pour améliorer la conservation, le non-gras est remplacé par du saccharose additionné d'un émulsifiant (lécithine) et d'un fluidifiant (citrate trisodique). A signaler aussi la crème en poudre. Leur conservation doit se faire sous azote.

PRODUITS ALLÉGÉS

Il s'agit de produits à teneur réduite en lipides. On distingue ceux dont la matière grasse est d'origine exclusivement laitière et ceux dont la matière grasse butyrique peut être additionnée de matières grasses d'origine végétale ou animale. Il existe de nombreux produits allégés et autres spécialités tartinables, de composition variable, leur teneur en matière grasse oscillant entre 20 et 65 pour cent. La composition moyenne des produits les plus courants est la suivante: lipides 41 pour cent, protides 7 pour cent, glucides 1 pour cent. Leur valeur énergétique est de l'ordre de 1 600 à 1 700 kJ pour 100 g.

La fabrication de ces produits fait appel à une technologie et à des équipements perfectionnés. Sa difficulté réside dans l'obtention d'une émulsion du type eau dans huile et dans la stabilité de celle-ci. Pour y parvenir, on mélange à la matière grasse des agents capables de fixer des quantités importantes d'eau, à savoir des lactoprotéines (babeurre concentré, caséinates). Il est en outre nécessaire d'apporter des agents émulsifiants, stabilisants et texturants. En raison de leur teneur élevée en eau (supérieure à 40 pour cent) ces produits sont très sensibles aux altérations d'origine microbienne. Il est donc indispensable de mettre en œuvre des moyens permettant d'éviter les contaminations et le développement des germes éventuellement présents, à savoir:

- hygiène générale stricte du personnel, des matériels et des locaux;
- utilisation de matières premières de très bonne qualité microbiologique;
- pasteurisation à température élevée (92-95 °C);
- emploi de conservateurs (sorbate);
- conditionnement ultra-propre (air surpressé, flux laminaire) sous emballage rigide et étanche et éventuellement sous gaz neutre.

Selon les réglementations propres à chaque pays, outre les additifs précités, on peut aussi ajouter à ces produits les éléments suivants:

- ingrédients divers destinés à leur donner une flaveur spécifique (aromates, sucre, sel, etc.);
- colorants naturels, notamment des caroténoïdes apportant en outre de la vitamine A;
- antioxygènes (acide ascorbique, gallates).

Fabrication

Après fermentation du babeurre à l'aide de bactéries lactiques acidifiantes et aromatisantes et concentration, celui-ci est mélangé aux matières grasses. Ensuite, après homogénéisation et apport des additifs divers, le mélange est pasteurisé puis traité selon divers procédés (échangeurs à surface raclée, tanks, etc.) de sorte qu'il y ait abaissement progressif de la température, cristallisation de la matière grasse et inversion des phases.

CRÈMES GLACÉES

Ce sont des produits obtenus par congélation d'un mélange de produits laitiers, de saccharose et d'ingrédients divers (parfums, colorants et stabilisants). Les constituants de base sont les suivants:

- lait (entier, écrémé, concentré, en poudre, lactosérum déshydraté, lactoprotéines);
- matière grasse butyrique (crème, beurre, matière grasse laitière anhydre). Certains pays admettent l'apport de graisses végétales;
- sucres (saccharose et, éventuellement, glucose, dextrose, sucre inverti, etc.).

A ces constituants sont généralement ajoutés les additifs suivants:

- arômes divers (fruits, jus de fruits, chocolat, café, caramel);
- stabilisants (carraghénates, alginates, agar-agar, pectine, caroube, gélatine, etc.);
- émulsifiants (mono- et diglycérides de glycérol, sucro-glycérides, lécithines, lactoprotéines).

Certaines crèmes glacées contiennent en outre des oeufs, des alcools et liqueurs, des additifs chimiques divers, des farines et des fécules. Les réglementations sur les crèmes glacées, très variables d'un pays à l'autre, rendent les produits souvent difficilement comparables. En principe, les produits laitiers devraient constituer de 60 à 85 pour cent de la matière sèche de la crème glacée prête à la consommation. La compilation des résultats d'analyses effectuées dans divers pays fait apparaître que les compositions les plus fréquentes varient dans les limites ci-après pour 100 g de produit fini:

Matière sèche totale	de 18 à 40 pour cent
Matière grasse	de 2 à 20 pour cent
Protéines	de 2 à 5 pour cent
Sucre	de 12 à 25 pour cent
Œufs	de 0 à 7 pour cent
Kilojoules	de 630 à 850.

Constituées de produits variés, souvent contaminés et subissant au cours de leur préparation de nombreuses manipulations, les crèmes glacées doivent toujours subir un traitement thermique d'assainissement et faire l'objet de sévères mesures d'hygiène en ce qui concerne le personnel, les équipements, les locaux et les emballages afin de préserver leur qualité microbiologique. Enfin, le maintien ininterrompu des basses températures est indispensable.

Principes de fabrication

Après mélange des différents constituants (à l'exception de certains parfums et colorants altérables par la chaleur), le produit est chauffé en cuve (à 68 °C pendant 30 minutes) ou dans un appareil à plaques ou tubulaires (à 80 °C pendant 25 secondes) ou encore dans un appareil UHT (à 100-130 °C pendant 40 secondes). Dans les fabrications industrielles, il est homogénéisé et éventuellement dégazé. On procède ensuite au refroidissement à une température ne dépassant pas 5 °C. Puis on fait subir au mélange une maturation à température maximale de 5 °C pendant le temps nécessaire au gonflement des agents stabilisants (de 10 à 12 heures dans le cas de la gélatine, du caroube ou de l'agar-agar, moins avec l'alginate de sodium).

Après maturation, le mélange est refroidi vers 0 °C, puis additionné éventuellement de parfums et de colorants. On procède alors au glaçage dans un freezer. Selon les réglages, on obtient une crème vers -6 °C plus ou moins molle dont le taux de foisonnement peut être de 100 pour cent. La crème molle peut être consommée en l'état ou répartie dans des moules, puis mise à durcir, soit en chambre froide à -25 °C pendant un temps variable suivant le volume des moules (de 12 à 24 heures), soit par passage en tunnel de réfrigération à une température comprise entre -30 et -40 °C.

Dans les petits ateliers, la congélation se fait dans une turbine à marche

discontinue, voire en sorbetière de ménage. Il s'agit d'un récipient immergé dans une saumure et comportant un dispositif énergique de brassage assurant en même temps que le glaçage le foisonnement par incorporation d'air. Le taux de foisonnement ne dépasse pas 50 à 60 pour cent.

VALEUR NUTRITIONNELLE DU BEURRE

Variabilité des composants

La teneur lipidique très élevée du beurre (82 pour cent) rend compte de presque toute sa valeur nutritive, puisque l'autre composant majeur est l'eau (16 pour cent). Il contient en outre de rares protéines, de glucides et des minéraux (tableau 64).

Au plan énergétique, la consommation de 50 g de beurre d'été peut satisfaire chez l'adulte 15 pour cent des besoins caloriques et en outre de 20 à 50 pour cent des besoins en vitamine A et de 15 à 20 pour cent des besoins en vitamine D. En effet, si les vitamines hydrosolubles ont quasi disparu du beurre (10 fois moins que dans le lait de départ), les vitamines liposolubles s'y trouvent en grandes quantités, notamment les vitamines A et E, mais aussi la vitamine D (environ 20 fois plus que dans le lait entier). Le beurre représente la source alimentaire naturelle la plus riche en vitamine A et le lait d'été en contient plus que le lait d'hiver (tableau 65). Cela vaut également pour la vitamine E, toujours présente sous sa forme α-tocophérol. Cet antioxydant évite l'auto-oxydation de la vitamine A et du ß-carotène, c'est pourquoi de la vitamine E est parfois ajoutée au beurre pour atteindre ce seuil de sécurité. Parfois, la vitamine C joue ce rôle.

Lors de la maturation de la crème, le lactose est converti en acide lactique par les bactéries produisant aussi du CO_2 et de l'acide acétique. D'autres bactéries convertissent l'acide citrique en acétone et diacétyl, ce qui imprime au beurre son arôme caractéristique. Seuls 10 à 40 pour cent de ces produits formés pendant la fabrication se retrouvent dans le beurre, les quantités résiduelles étant perdues dans le babeurre. La saveur du beurre dépend de ces métabolites apparus au cours du processus de fabrication (diacétyl, acétoïne, aldéhydes, cétones, lactones, etc.), ainsi que d'une addition éventuelle de sel. L'importance de ces graisses lactiques et leur influence sur la santé ont été discutées au chapitre 2.

TABLEAU 64
Teneur moyenne de différents composants du beurre, du yaourt et de la crème glacée (par kg)

Composants	Unités	Beurre	Yaourt	Crème glacée
Protéines	g	7	39	39
Glucides	g	7	46	210
Minéraux	g	1,2	7,4	8
Lipides	g	832	38	117
Calcium	g	0,16	1,2	1,3
Phosphore	g	0,2	0,9	1,0
Sodium	g	0,06	0,45	0,80
Potassium	g	0,2	1,6	1,35
Magnésium	g	0,02	0,14	0,14
Zinc	mg	2,0	4,0	8,0
Manganèse	mg	0,4	0,025	0,6
Fer	mg	0,9	1,0	0,9
Cuivre	mg	0,15	0,1	0,25
Fluor	mg	1,3		
Iode	mg	1,3		
Chrome	mg	0,15		
Sélénium	µg	3,0	5,0	

Modifications nutritionnelles du beurre au cours du stockage

Les taux de vitamines du beurre restent stables tout au long du stockage, même prolongé, mais les taux de substances aromatiques diminuent progressivement, sauf pour certaines (lactones, acides volatils, etc.). Après 1 mois à 10 °C, la teneur en diacétyl tombe au tiers de sa valeur initiale. Le beurre est surtout, fortement sensible à l'oxydation, notamment des oligo-éléments. Parmi ceux-ci, le cuivre surtout, mais aussi le fer, le chrome, le cobalt et le molybdène jouent un rôle essentiel. Ces éléments passent du lait dans le beurre, tandis que l'essentiel du zinc et du magnésium demeurent dans le lactosérum.

TABLEAU 65

Teneur moyenne en vitamines et en acide lactique du beurre, du yaourt et de la crème glacée (par kg)

Vitamines et acide lactique	Unités	Beurre	Yaourt	Crème glacée
Carotène	mg	5,8	0,15	1,96
A	mg	6,8	0,30	11,4
B_1	mg	0,06	0,40	0,42
B_2	mg	0,19	2,0	2,0
B_6	mg	0,04	0,5	0,55
Acide Nicotinique	mg	0,5	1,4	1,25
B_{12}	µg	traces	3	traces
Folates	mg	traces	0,1	0,08
Acide pantothénique	mg	2,3	3,8	5,0
Biotine	mg	traces	3	0,02
C	mg	0	10	5
D	µg	10		10
E	mg	28	1,8	1,2
K	mg	0,6		2,1
Acide lactique	g		8	

Des saveurs désagréables peuvent apparaître suite à la formation d'acides gras volatils et de méthyl-cétones. Ces composés n'apparaissent qu'après des durées prolongées et sous des températures de conservation trop élevées. A l'emballage, il faut éviter toute contamination du beurre par le cuivre (>0,1 mg/kg) alors que le fer ou le manganèse ne présentent aucun inconvénient. Par contre, la lumière (UV) oxyde le beurre qui doit en être protégé (emballage aluminium). Les peroxydes lipidiques se décomposent en cétones et aldéhydes qui altèrent la saveur du beurre. La lumière de son côté dénature la vitamine A. Quant aux substances aromatiques qui donnent au beurre une odeur désagréable, elles sont le résultat d'une auto-oxydation des acides gras polyinsaturés. Ce processus peut être très fortement limité par une addition de vitamine C. Celle-ci à des teneurs faibles (ou physiolo-

giques) permet, voire favorise, l'oxydation des lipides alors qu'à des teneurs élevées (50-200 mg/litre) elle l'inhibe. Ces modifications peuvent jouer un rôle majeur, entre autres sur la teneur du beurre en acides gras essentiels en soi déjà normalement basse (3 pour cent des graisses totales pour le linoléique et moins de 0,5 pour cent pour l'arachidonique).

L'enrobage du beurre dans un emballage de polyvinyle risque de voir cette substance le contaminer. En pratique, les taux de vinyle restent très faibles. Des progrès notables ont été réalisés dans la conservation du beurre par une extraction quasi complète de l'eau (à peine 0,2 pour cent d'eau et de matières non grasses résiduelles ou 99,6 pour cent d'huile de beurre). L'huile de beurre (ou beurre fondu), produite sous vide, contient encore les phospholipides membranaires des globules gras, ce qui protège l'huile de l'oxydation. A 15 °C, cette huile se conserve pendant 1 à 3 ans. Cette durée peut être portée à beaucoup plus par un stockage à basse température et en présence d'antioxydants. La fabrication de tels produits est appréciée dans les pays chauds (tropicaux) et en développement: le beurre fondu (ghee en Inde) est très répandu et son arôme caractéristique émane des substances telles que les aldéhydes, les cétones et même des acides gras libres.

Beurres allégés

L'intérêt nutritionnelle des beurres allégés réside dans une teneur réduite en matière grasse (41 pour cent plutôt que 82 pour cent). De la matière grasse végétale est parfois adjointe au composant laitier.

VALEUR NUTRITIONNELLE DE LA CRÈME

La valeur nutritionnelle de la crème dépend de la teneur lipidique: plus la crème contient de graisses, moins elle contient de lactose, de minéraux et de protéines et plus elle contient de la vitamine A et des carotènes. La crème contient environ deux fois plus de vitamines liposolubles que le lait, mais à peine moins de vitamines hydrosolubles. La crème épaisse (surie) contient des aldéhydes et des cétones à l'origine de son goût particulier, ainsi que de l'acide lactique (8 g/litre environ). La crème glacée contient autant de minéraux et de vitamines hydrosolubles que le lait mais deux à trois fois plus de vitamines liposolubles (voir tableau 65).

VALEUR NUTRITIONNELLE DU BABEURRE

A l'inverse du beurre, le babeurre contient peu de vitamines liposolubles et son taux d'acide lactique est élevé, de sorte que ce dérivé peut être considéré comme un produit fermenté. De fait, lors de la fabrication du beurre, un nombre de substances aromatiques passent dans le babeurre (diacétyl de 1 à 4 mg/litre). Les teneurs calciques et en riboflavine du babeurre sont celles du lait. Ce dérivé est aussi très riche en lécithine, dans la mesure où une forte quantité de phospholipides passe dans le babeurre lors de la fabrication du beurre. Le babeurre en contient 20 pour cent alors que le lait entier n'en contient que 1 pour cent seulement. Le babeurre doit être conservé à l'abri de l'air pour éviter son oxydation (source de goût désagréable) et la perte vitaminique (vitamine C notamment).

Chapitre 9

Consommation du lait et des produits laitiers chez le bien-portant et le malade

HABITUDES DE CONSOMMATION CHEZ LE SUJET SAIN

Introduction

La plupart des nouveau-nés sont allaités par leurs mères, d'autres reçoivent d'emblée un dérivé lacté artificiel, voire même un lait animal. D'une manière ou d'une autre, presque tous les nourrissons reçoivent du lait. Les habitudes parentales conditionnent ensuite les comportements alimentaires qui se différencient selon les régions du monde. Ces attitudes diverses, qui paraissent bien souvent régies par des coutumes ancestrales, dépendent aussi de critères très nettement ancrés dans les gènes. On constate que les comportements alimentaires répondent, en réalité, plus à des divisions ethniques qu'à des répartitions géographiques.

La place du lait en nutrition humaine n'est pas le fruit du hasard, mais est régie par des potentialités génétiques mal élucidées; la disparition ou le maintien de l'activité lactasique intestinale paraît y jouer le rôle primordial (Kretchmer, 1972). Ce n'est pas seulement la disponibilité du lait qui conditionne sa consommation, mais aussi et plutôt la tolérance au lait qui a incité l'homme à en faire une nourriture ordinaire au-delà du sevrage. Face à l'hypolactasie, certaines populations ont été capables de s'adapter en consommant des produits appauvris en lactose (fromages) ou des dérivés simultanément riches en ß-galactosidase (lactase) microbienne (yaourt). D'autres populations n'ont pas été capables de contourner cette difficulté digestive et ont tout simplement renoncé à consommer du lait et, dans le même pas, tout dérivé laitier (Delmont, 1983). Le retentissement sur la santé

de cet attrait ou de ce refus du lait est difficile à préciser. D'autres facteurs interfèrent compliquant l'interprétation des données épidémiologiques.

En situation d'abondance, c'est-à-dire dans les pays industrialisés et nantis, une consommation importante de lait et/ou de produits laitiers fait partie des facteurs de risque de la maladie coronarienne, avec le tabagisme, l'obésité, le stress, l'hypertension artérielle et le manque d'exercice physique. Il existe une relation entre le risque de développer une maladie cardio-vasculaire et la consommation d'énergie lipidique, notamment de calories provenant de matières grasses saturées. L'apport lipidique du lait de vache et des produits dérivés est constitué surtout de graisses saturées (voir chapitre 2) et le cholestérol y est très présent.

Cependant, l'ensemble de ces facteurs de risque précités, et peut-être encore d'autres, semblent nécessaires pour voir leurs effets nuisibles se révéler. On est surpris de constater la quasi-innocuité de la consommation de lait et de beurre chez les Bretons en France (la mortalité précoce, entre 45 et 54 ans, par maladie des coronaires est plus faible dans les départements bretons que dans les départements du Nord et de l'Est de la France) (J. Renaud, 1985). Dans le même ordre d'idée, les Masaïs d'Afrique de l'Est semblent échapper à l'hypercholestérolémie et aux lésions d'athérome malgré une consommation alimentaire axée sur les produits animaux (lait, sang et viande de vache).

Les inconvénients attribués à la consommation du lait ne sont apparemment pas des constantes: trouver aux produits laitiers une place en nutrition humaine relève aussi de l'art de les accommoder judicieusement. Souvent, les populations ont trouvé localement et depuis longtemps les modalités de préparation et de conservation idéales du lait ou des produits qu'elles en ont dérivés. Là où les conditions d'élevage et le climat ne permettaient pas que ces conditions idéales fussent réunies, ces difficultés ont pu être surmontées grâce aux techniques industrielles modernes (fabrication de poudres de laits, conservation de longue durée) ainsi qu'aux possibilités d'acheminer le lait et les produits laitiers sur de longues distances. Ces bouleversements techniques ont permis aux populations d'envisager des emplois nouveaux et adaptés du lait et de ses dérivés.

Ce chapitre regroupe des informations sur la place que tiennent actuelle-

ment les produits laitiers dans l'alimentation ainsi que quelques indications sur celle qu'ils pourraient y occuper.

Appétence et acceptabilité du lait

L'importance économique du lait (et de tout autre produit) en alimentation passe avant tout par le goût du consommateur. En général, le lait présente un tonus émotionnel faible. Il n'excite pas une appétence comparable à celle de certaines boissons (sucrées, alcoolisées) ou d'autres aliments, comme la viande ou même les fromages.

Le lait fait sécréter une salive épaisse et donc peu rafraîchissante. Il semble que la forme la mieux acceptée soit le lait pasteurisé ou stérilisé UHT, homogénéisé, demi-écrémé, non bouilli et consommé froid. Les pouvoirs excito-moteurs du lait sur les sécrétions gastriques et pancréatiques sont assez faibles: la sécrétion de pepsine est plus forte pour la viande et le pain. Généralement, les produits dérivés du lait, notamment les laits acidifiés et fermentés, les fromages et le beurre sont plus volontiers consommés et mieux digérés que le lait lui-même.

Consommation du lait en période de croissance

Allaitement maternel exclusif. Le nouveau-né et le nourrisson devraient, jusqu'à 3 ou 4 mois, être exclusivement allaités. Le lait maternel suffit à lui seul à assurer la croissance du nourrisson jusqu'à 4 mois. A partir de 4 à 6 mois, il faut le compléter avec d'autres aliments, mais l'allaitement doit se poursuivre. Les avantages nutritionnels de la composition du lait de femme ont été largement détaillés dans le premier chapitre. A cela, il convient d'ajouter d'autres qualités irremplacables, telle la présence en quantités appréciables d'anticorps du type sécrétoire (s IgA) qui protègent au moins partiellement le nourrisson contre un éventail de micro-organismes pathogènes (Hansson, 1988), sans parler de l'hygiène du lait lui-même (à priori stérile dans la mamelle) et du lien psycho-affectif que constitue l'allaitement.

Lorsque l'allaitement suffit, la croissance staturo-pondérale progresse et le développement psychomoteur évolue harmonieusement. C'est sur la base de ce développement harmonieux qu'on peut établir les besoins nutrition-

nels et édicter des recommandations diététiques pour les périodes néonatales et infantiles. Les valeurs chiffrées sont déduites des analyses de la composition du lait de femme et d'une appréciation des consommations individuelles.

Alimentation lactée de substitution. Si la majorité des nouveau-nés de notre monde prennent du lait maternel, la plupart d'entre eux (en raison surtout d'une insuffisance de la production lactée maternelle) reçoivent aussi avant 3 mois une alimentation de supplémentation. Un pourcentage non négligeable de nourrissons ne sont pas (ou à peine) allaités par leur mère. Une alimentation lactée de substitution leur est proposée, soit un lait adapté en poudre, soit, le plus souvent, un lait animal non modifié. Dans toutes ces situations, les informations et les recommandations basées sur l'allaitement ne sont plus de mise et deviennent donc caduques. Certaines données restent en vigueur quand les laits proposés sont adaptés aux particularités propres des nourrissons: on parle dans ces cas plus volontiers de formules infantiles. Quelques principes nutritionnels à observer sont énumérés ci-après.

Le lait de vache non modifié est trop riche en protéines et en caséines pour les capacités digestives (formation d'un caillé peu digeste) et métaboliques (élimination d'une charge azotée excédant les possibilités rénales) du très jeune enfant. La quantité de minéraux (sodium, calcium, phosphore) est très élevée et demande à être réduite pour éviter de solliciter trop la fonction rénale d'épuration. L'adaptation du lait de vache pour en faire un substitut acceptable du lait humain consiste donc à réduire la teneur de caséine, de sodium, de phosphates et aussi de calcium tout en restant à des niveaux d'apports sensiblement supérieurs à ceux du lait humain (Tsang et Nichols, 1988). De la sorte, la moindre biodisponibilité des nutriments est contrebalancée et les besoins d'une large proportion de la population infantile peuvent être assurés. Enfin, les nutriments qui se dégradent lentement en cours de conservation restent présents en quantités suffisantes.

L'absorption partielle des graisses lactiques chez le nouveau-né et le très jeune nourrisson et surtout la carence en acides gras essentiels du lait animal de consommation courante ont conduit à modifier également les matières grasses dans les formules infantiles par l'adjonction d'huiles de maïs et de

soja qui impose à son tour de réaliser un apport vitaminique E suffisant pour éviter un risque d'instabilité des membranes tissulaires.

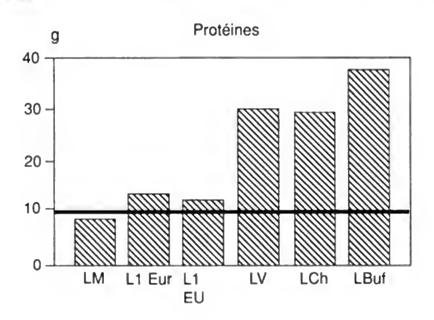
Le lait de vache contenant moins de lactose que le lait humain, un enrichissement en glucides est nécessaire et souvent obtenu grâce à l'adjonction de dextrines-maltose. Ce procédé est peu coûteux, mais évite surtout d'accroître l'osmolarité du lait. Enfin, le processus industriel (chaleur) dégrade en partie plusieurs vitamines. Une quantité connue et de sécurité de vitamines est donc ajoutée en fin de la filière de fabrication.

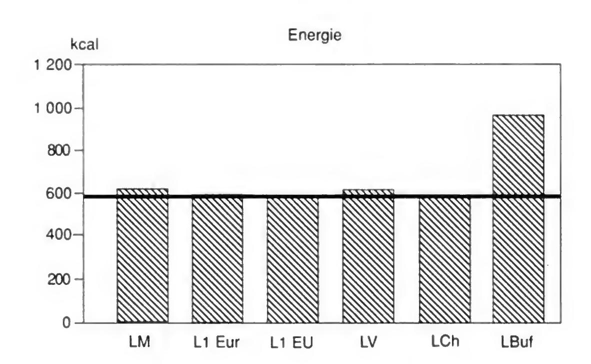
Pour les minéraux et les minéraloïdes, des adaptations sont également souhaitables: le rapport calcium/phosphore doit idéalement être situé entre 1,5 et 2 afin de favoriser l'absorption calcique. La teneur calcique ne peut excéder les possibilités de solubilisation dans la formule lactée. Du fer est ajouté pour couvrir les besoins du nourrisson, ainsi qu'un nombre d'oligo-éléments, dont le cuivre, leur taux particulièrement bas dans le lait de vache ne permettant pas d'assurer les apports recommandés.

L'adaptation des laits animaux pour la consommation infantile tient compte également de la charge osmotique rénale. Les capacités rénales de concentration chez le nouveau-né et le nourrisson sont faibles, et encore moindres chez le prématuré. De ce fait, les déchets métaboliques azotés et minéraux entraînent avec eux dans la phase d'excrétion rénale une quantité importante d'eau. Dans la pratique, le lait maternel est surtout remplacé en période d'alimentation lactée exclusive (de 0 à maximum 4 mois en général) par un nombre limité de produits: du lait de vache (parfois coupé), du lait de chèvre ou des formules adaptées (dérivées du lait de vache). Ces dernières diffèrent quelque peu selon qu'elles ont été conçues en Europe (laits adaptés du premier âge) ou en Amérique du Nord (lait standard pour la première année). La figure 21 et le tableau 66 illustrent le taux de couverture de l'ensemble des besoins de la tranche d'âge concernée par l'un et l'autre de ces produits lactés. D'emblée, les insuffisances ou dépassements en nutriments qu'entraînent les divers régimes lactés sont visibles.

Les procédés d'humanisation du lait de vache, souvent ingénieux, génèrent aussi par eux-mêmes des effets secondaires inattendus. Ils restent parfois longtemps méconnus (laits dépourvus de chlore, carencés en pyri-

FIGURE 21
Couverture des besoins en énergie et en protéines du nourrisson (de 6 kg recevant 150 ml/kg) par différents laits





LM: lait maternel; L1 Eur: lait de départ vendu en Europe; L1 EU: lait de départ vendu aux Etats-Unis; LV: lait de vache; LCh: lait de chèvre; LBuf: lait de bufflonne

TABLEAU 66

Couverture des besoins d'un nourisson de 6 kg recevant 900 ml* de lait maternel ou de lait de certaines espèces animales ou de laits industriels vendus en Europe et aux Etats-Unis

Types de lait	Nutriments									
	Calcium *(mg)*	Fer *(mg)*	Zinc *(mg)*	Vitamine B_1 *(mg)*	Vitamine B_2 *(mg)*	Acide folique *(µg)*	Vitamine C *(mg)*	Vitamine A *(µg)*	Vitamine D *(µg)*	Vitamine E *(mg)*
Lait maternel	290	2,7	0,6	0,15	0,40	38,5	38	480	0,7	5,1
Lait de départ (Europe)	500	6,9	5,0	0,37	0,81	53,6	50	585	13,2	7,3
Lait de départ (Etats-Unis)	500	3,5	10,4	0,45	0,57	44,8	51	585	8,9	9,0
Lait de vache	875	3,3	0,4	0,33	1,58	33,1	16	256	0,5	0,7
Besoins ou taux quotidien recommandé (OMS)	400	5,0	6,0	0,30	0,40	25,0	30	375	7,5	3,0

* On compte généralement 150 ml de lait par kg de poids corporel.

doxine, déficients en cuivre) ou à peine évoqués (laits potentiellement allergisants).

Alimentation du sevrage. Si les habitudes et les pratiques du sevrage varient à l'infini, le lait (de femme ou d'animal) y trouve toujours une place qui va du tout à rien. Sous une forme ou une autre, le lait constitue la base de l'alimentation jusqu'à 1 an et couvre la totalité des besoins jusqu'à 3 ou 4 mois. Avec l'introduction d'une alimentation solide (bouillie de céréales avec/sans fruits ou légumes), sa part relative tend à diminuer. Avec l'apparition dans l'alimentation d'autres types de solides (souvent des légumes autour de 5 mois), la part du lait se réduit encore, mais la quantité absolue consommée chaque jour ne tombe souvent pas en dessous du demi-litre dans les pays industrialisés et n'atteint pas toujours le tiers de litre dans les pays en développement, même chez les enfants allaités. A défaut de lait maternel, le lait consommé (ou du moins recommandé) est un lait de vache modifié: en Europe les sociétés pédiatriques prônent l'emploi d'un lait dit de suite ou de deuxième âge (ESPGAN, 1981 et 1990); en Amérique du Nord la faveur se porte plutôt sur un lait de composition uniforme pour toute la première année de vie. Ailleurs, la situation est différente. Dans les pays en développement, le choix est limité dans la plupart des cas, soit à la poursuite de l'allaitement maternel, soit à l'emploi de lait de vache non modifié.

Ces usages plus souvent imposés que choisis conduisent à des profils de consommation alimentaire très différents: à 5 mois certains nourrissons prennent encore (et exclusivement) le sein, d'autres reçoivent une formule dite de départ ou un lait de suite, une formule adaptée pour toute la première année de vie, ou enfin du lait de vache non modifié (sous forme de biberon ou de bouillie lactée). Un enfant exclusivement nourri de lait pour couvrir très justement tous ses besoins en énergie (l'un des facteurs essentiels conditionnant l'appétit) consomme un ensemble de nutriments (protéines, glucides et calcium) en excès alors que d'autres lui font défaut (fer, cuivre et acides gras essentiels). A 8 ou 9 mois, quand certains dérivés lactés (yaourt et fromage blanc, en particulier) prennent le relais des fruits notamment, les problèmes diététiques ne font que s'aggraver, et ce d'autant plus que d'autres aliments d'origine animale ne sont pas proposés ou disponibles.

Seuls la viande et le poisson apportent le fer, du moins de qualité biologique suffisante. La même remarque vaut pour le zinc et dans une moindre mesure pour le cuivre.

Inversement, le lait et/ou ses dérivés constituent une source de calcium inégalable et les protéines de ces produits sont d'une valeur irremplaçable pour l'enfant. Cette qualité peut être appréciée en termes de haute valeur biologique (protéines de référence), de coût faible (protéines animales peu chères à la production), de conservation assez aisée, de conditionnement codifié (poudre) permettant une production hygiénique. Toutefois, les conditions d'utilisation des laits en poudre laissent beaucoup à désirer (contamination microbienne des eaux, manque d'hygiène dans la préparation).

Le lait accepte aussi facilement des additifs, des vitamines, et de l'iode, en particulier, qui en augmentent encore la valeur nutritionnelle. De fait, les meilleures preuves de qualité du lait sont les troubles nutritionnels que développent les enfants soumis à un régime d'exclusion lactée drastique (en cas de régime végétarien ou d'allergie aux protéines du lait de vache). De nombreuses études font état de déficits causés par des alimentations de substitution mal équilibrées. Les carences en acides aminés soufrés et même en cuivre étaient le lot des sujets exclusivement nourris aux laits infantiles de soja de la première génération. Des troubles (rachitisme) apparaissent aussi lorsque des laits de soja liquides destinés aux adultes et dépourvus de calcium et de phosphore sont donnés abusivement aux nourrissons. Des régimes végétariens stricts peuvent mener à des anémies mégaloblastiques et à des hyperkaliémies (excès de potassium dans le sang et dans l'organisme entier).

Puisque le lait (humain ou animal) constitue l'aliment de base de la première année de vie, sa suppression implique qu'on le remplace par un aliment (lait de substitution) ou un ensemble d'aliments d'origine animale (viande, poisson, œufs, en combinaison avec un lait animal) qui contienne tous les nutriments du lait maternel et tienne compte de la teneur en nutriments de chaque constituant et de leur biodisponibilité.

Dans bien des circonstances, liées à la production, à la conservation ou au prix, les produits laitiers animaux (laits liquides, fromages, yaourts) ne sont

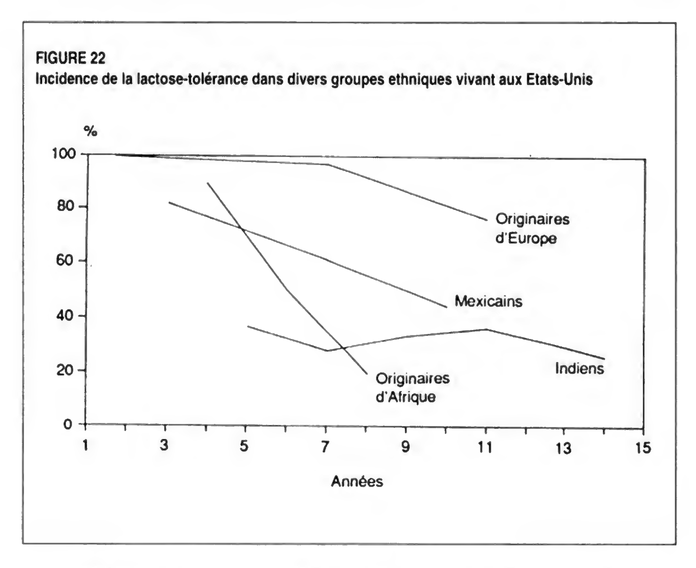
pas accessibles, pas plus que les laits infantiles en poudre. La préparation artisanale, voire domestique, d'un aliment de sevrage permet de surmonter ces obstacles, en particulier celui du coût. Ainsi, la valeur nutritionnelle d'un aliment de ce type, préparé à partir de 65 g de farine de riz, 25 g de lait écrémé en poudre, 10 g de sucre et 6 ml d'huile de palme, est voisine de celle de 100 g d'une farine lactée du commerce. Cet aliment, pris en quantité suffisante, peut compléter efficacement l'alimentation au sein d'un nourrisson.

Installation de l'hypolactasie de type adulte

Evanescence de la consommation de lait. Chez le nourrisson, c'est le composant protéique qui est le plus susceptible d'entraver la consommation de lait animal en raison du risque (de 1 à 10 pour cent des sujets suivant les publications) d'allergie aux protéines du lait de vache. C'est le composant glucidique qui limite le plus la consommation de lait aux âges ultérieurs (Delmont, 1983). L'activité intestinale lactasique (ß-galactosidase, qui est une disaccharidase de la bordure en brosse intestinale au sommet des villosités digestives et qui hydrolyse le lactose en glucose et galactose) de la majorité des individus diminue avec le temps (figure 22). Cette évolution est sous contrôle génétique. Certains sujets (les moins nombreux) conservent cette capacité enzymatique toute leur vie (voir tableaux 67 et 68). Pour les autres populations, cette activité disaccharidasique diminue inexorablement, mais sans disparaître complètement. Le moment et la vitesse de disparition de l'activité varient (figure 22). Les facteurs qui conditionnent ces changements chez l'homme ne sont pas connus, mais diffèrent, toutefois, en bien des points de ce qui a pu être établi avec certitude chez l'animal, chez les petits mammifères notamment.

Dans l'espèce humaine, l'effet inducteur du lactose sur son enzyme clivant n'a jamais pu être démontré: ce n'est donc pas l'abandon de la consommation du lait qui conditionne la disparition lactasique, mais plutôt l'inverse. Lorsque le lactose n'est plus digéré (de fait ni hydrolysé ni absorbé), des symptômes surviennent: le lactose resté intact dans la lumière intestinale induit par effet osmotique une augmentation du transit digestif accompagnée de crampes et d'une diarrhée aqueuse souvent acide avec des selles contenant des sucres réducteurs. Dans le colon, la fermentation

FIGURE 22
Incidence de la lactose-tolérance dans divers groupes ethniques vivant aux Etats-Unis



microbienne du disaccharide mal absorbé provoque la formation de substances volatiles, cause de ballonnement et d'émissions de gaz. Lorsque cette flore de récupération des glucides est en outre productrice d'hydrogène, ce gaz apparaît dans l'air expiré (mesure de l'hydrogène expiré). L'inconfort abdominal, voire l'intolérance digestive, n'incite plus le sujet devenu hypolactasique à continuer de boire du lait. Il semble bien que les ennuis de l'intolérance aboutissent à l'abandon de la prise de lait. Ce moment survient chez le sujet génétiquement prédisposé entre 5 et 15 ans (figure 22). Un épisode de gastro-entérite grave, un état de malnutrition chronique semblent précipiter la survenue de cet état. Lorsque le lactose n'est plus toléré (500 ml de lait de vache équivalent à environ 25 g de lactose, soit une prise de l'ordre de 1,0 ± 0,2 g/kg/jour pour un enfant dont le poids est compris entre 18 et 35 kg), d'autres aliments appauvris en lactose peuvent continuer de l'être.

TABLEAU 67

Incidence de l'intolérance au lactose dans divers groupes de la population américaine et australienne

Pays	Indiens natifs	Esquimaux	Originaires d'Europe	Originaires d'Afrique	Originaires d'Asie	Indiens déplacés
Continent américain						
Canada	31-57 (54)	24-30 (40)	12-37 (32)	–	–	–
USA	120-147 (82)	29-36 (81)	33-235 (14)	99-143 (69)	68-73 (93)	160-303 (53)
Mexique	309-401 (77)	–	–	–	–	–
Brésil	– –	–	18-24 (75)	19-20 (95)	20-20 (100)	–
Chili	36-64 (56)	–	–	136-195 (70)	–	–
Océanie						
Australie	38-45 (84)	–	12-82 (15)	–	89-97 (92)	–

Note: Les chiffres entre parenthèses indiquent les pourcentages.
Source: Scrimshaw et Murray, 1988.

Introduction alimentaire de substituts laitiers: laitages de substitution. Les travaux réalisés à ce jour ont principalement porté sur l'étude du yaourt, utilisé empiriquement par les pédiatres. La mesure de l'hydrogène expiré a permis une approche chiffrée et plus objective de l'intolérance au lactose en réponse à la consommation de divers produits laitiers. Ces travaux montrent chez les sujets cliniquement intolérants qu'à quantités égales de lactose ingéré, le lait ou le lactose entraînent dans les heures qui suivent une élimination importante et comparable d'hydrogène, à la différence du yaourt. Il est important de noter que la faible élimination respiratoire d'hydrogène observée avec le yaourt va de pair avec une quasi-disparition des symptômes cliniques d'intolérance, alors que ces signes se manifestent lors de l'ingestion du lait ou du lactose. Cet effet du yaourt disparaît, au moins en partie, lorsque celui-ci a été préalablement chauffé. La thermisation du yaourt est utilisée dans certains pays: en tuant les germes, la

TABLEAU 68

Incidence de l'intolérance au lactose dans divers pays d'Europe, d'Afrique et d'Asie

Pays	Nombres	Pourcentages
Europe du nord		
Groenland (Esquimaux)	120-219	55
Danemark (Esquimaux)	37-51	73
Finlande	51-290	18
Suède	7-91	8
Irlande	2-50	4
Allemagne	268-1805	15
Autriche	106-528	20
Hongrie	198-535	37
Pourtour méditerranéen		
Italie (du sud)	116-180	64
Grèce	479-700	68
Liban	58-78	74
Jordanie	154-204	76
Egypte	414-570	73
Afrique noire		
Soudan	210-282	74
Nigéria	67-83	81
Zambie	25-26	96
Zaïre	65-86	76
Afrique du sud	165-197	84
Asie		
Inde (nord)	27-95	2 870
Inde (sud)	146-210	70
Ceylan	145-210	100
Thaïlande	215-215	100
Japon	35-35	75
Corée	226-300	

Source: Scrimshaw et Murray, 1988.

conservation peut se faire hors chaîne du froid. Cependant, dans le cas du yaourt obtenu en poudre par séchage à une température inférieure à 60 °C, la tolérance est conservée. Ces faits ont été établis chez des enfants gabonais intolérants après une charge de 10,5 g de lactose contenus dans la poudre de lait ou de yaourt reconstitués (Gendrel *et al.*,1990). L'absence ou la très faible production d'hydrogène observée après l'ingestion de yaourt chez des sujets intolérants signifie que le lactose n'atteint vraisemblablement pas le colon. Les mécanismes en cause restent mal connus. L'activité lactasique de la flore du yaourt (ß-galactosidase) joue certainement un rôle.

Un autre effet physiologique important est le ralentissement du transit intestinal observé avec le yaourt par rapport au lait. Ce ralentissement peut contribuer à la meilleure digestion du lactose. Diverses préparations de laits fermentés ont été essayées sur des sujets intolérants au lactose. Le yaourt paraît le mieux supporté du fait de la présence de *Lactobacillus bulgaricus* (producteur de ß-galactosidase). Le lait fermenté par *L. acidophilus* a des effets variables, cela étant dû sans doute à d'importantes différences de production enzymatique entre les souches.

Consommation du lait et importance alimentaire chez l'adulte sain

Il faut distinguer deux aspects de la consommation courante de lait ou de produits laitiers: l'adulte les consomme de façon consciente (yaourt, fromages) mais aussi sans le savoir (des sous-dérivés ou des composants du lait sont incorporés très fréquemment dans les préparations industrielles). Les quantités restent faibles, mais suffisantes pour nuire au sujet allergique, par exemple. L'industrie agro-alimentaire utilise volontiers des dérivés du lait, en raison de leurs bonnes qualités technologiques et de leurs faibles coûts. Les lécithines de lait entrent dans la composition de la plupart des margarines végétales, le lactosérum est ajouté dans des conserves et des charcuteries, du lait entier fait rarement défaut dans les biscuits.

La consommation de produits laitiers peut être appréciée en se basant sur des chiffres de production à l'échelle des pays (OCDE, 1991). Connaissant les quantités exportées, il est possible de calculer en chiffres bruts (ne tenant pas compte des pertes, avaries, invendus) les volumes ou les quantités de laits sous leurs différentes formes et de produits laitiers restés théoriquement

à disposition des populations. L'OCDE ne fournit des données que pour les pays industrialisés (tableau 69). Au chapitre 3, il est indiqué que la FAO cherche à établir des données similaires pour l'ensemble des pays, tout en sachant que la valeur de l'outil statistique n'est pas la même dans tous les pays (voir tableau 39, p. 92).

Le lait et ses dérivés sont consommés en grandes quantités dans les pays industrialisés (Europe, Amérique du Nord, Australie), à l'exception sans doute du Japon. Dans ces pays, les laitages représentent une part importante (30 à 50 pour cent) de l'apport protéique total, lui-même déjà excédentaire. Dans les pays en développement, la situation est presque exactement inverse. La part de produits animaux (viandes, poissons, œufs, laitages) est de toute manière faible et les produits laitiers ne constituent qu'une proportion négligeable dans la consommation protéique (de 10 à 15 pour cent) (figure 23).

Importance nutritionnelle des produits laitiers chez l'adulte sain

Dans la mesure où la plupart des adultes ne consomment que peu de lait, ce sont plutôt les produits laitiers qui seront envisagés ici, même si fondamentalement la différence de composition est minime et ne porte que sur le lactose.

Le lait et le yaourt se différencient par leur influence sur le cholestérol sanguin: celui-ci diminue, selon certains auteurs, de 5 à 10 pour cent lorsque le yaourt remplace la quantité équivalente du lait antérieurement consommé. Cet effet est le plus marqué chez les sujets dont le taux de cholestérolémie initial est le plus élevé; il peut aussi varier selon la souche de ferment du yaourt. Des effets protecteurs du yaourt vis-à-vis de certains risques cancérigènes ont été aussi suggérés. En outre, la stimulation des défenses de l'organisme semble être un effet imputable à certains composants du yaourt, du moins non thermisé.

Certains laits fermentés traditionnels présentent des intérêts nutritionnels propres. Ces laits ne sont pas toujours des laits de vache; ils contiennent souvent des ferments actifs en très grand nombre, ce qui en limite la consommation. Le kéfir et le koumis (voir chapitre 5) contiennent de l'alcool. Tout comme le yaourt, ces produits démontrent de multiples vertus

TABLEAU 69

Disponibilité en produits laitiers dans différents pays industrialisés en 1987 (ou années antérieures)

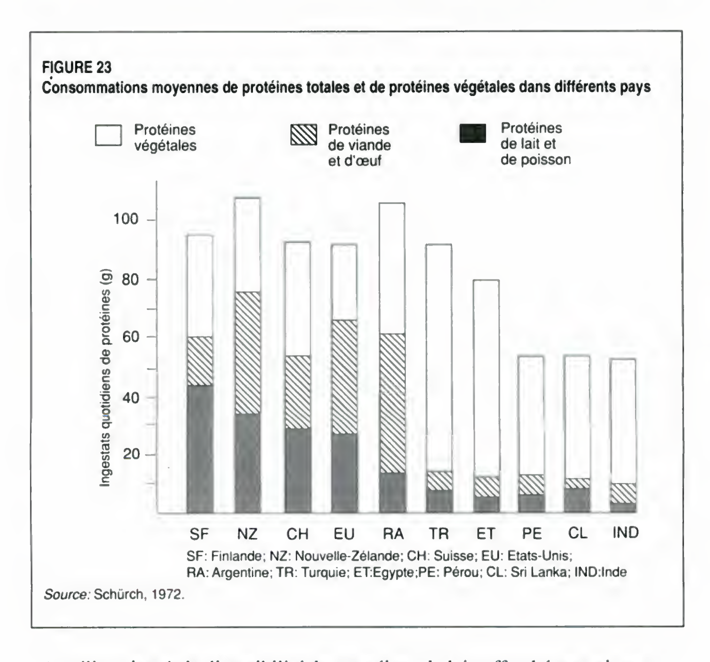
Pays	Aliments (g/jour)								Valeur nutritive totale (beurre exclu)	
	Lait frais entier	Lait frais écrémé	Lait en en poudre entier	Lait en poudre écrémé	Lait concentré entier	Lait concentré écrémé	Fromage	Beurre	Energie/jour (kcal)	Protéines/jour (g)
Autriche	374,4	30,0	1,4	1,1	5,8	?	21,3	14,4	409,8	26,8
Allemagne[1]	190,1	63,0	4,6	1,1	14,8	–	43,9	22,9	344,47	26,5
Belgique-Luxembourg	237,3	92,4	6,1	2,7	2,4	?	33,6	22,7	364,8	26,6
Danemark	396,3	193,3	1,6	0,5	–	?	34,7	29,9	461,2	33,2
Espagne	271,8	?	0,8	1,3	3,4	?	12,2	1,1	236,4	15,0
Finlande	573,3	364,5	–	10,0	?	?	31,6	19,9	658,4	47,5
France	230,9	131,4	1,5	3,6	2,1	–	59,9	24,0	428,7	35,0
Irlande	732,5	162,4	–	0,8	–	?	11,6	19,4	585,1	35,8
Italie	201,7	37,5	1,3	–	0,4	?	40,7	6,9	302,1	23,3
Norvège	864,7	83,9	0,7	2,6	6,5	?	35,1	10,4	558,5	37,2
Pays-Bas	302,5	190,9	7,8	1,5	27,5	–	37,7	9,6	471,2	34,1
Portugal	133,4	?	1,3	2,7	0,3	?	13,3	2,7	146,8	10,3
Suède	420,5	243,5	1,9	7,5	?	3,6	44,2	14,9	565,2	42,0
Suisse	468,9	112,1	3,3	1,2	2,1	?	41,9	17,7	514,8	36,1
Royaume-Uni	374,2	56,7	3,3	5,6	7,8	?	20,1	13,8	367,2	24,3

TABLEAU 69 (fin)

Pays	Aliments (g/jour)								Valeur nutritive totale (beurre exclu)	
	Lait frais entier	Lait frais écrémé	Lait en en poudre entier	Lait en poudre écrémé	Lait concentré entier	Lait concentré écrémé	Fromage	Beurre	Energie/jour (kcal)	Protéines/jour (g)
Australie	442,0	?	5,8	8,1	4,6	3,0	5,8	10,8	440,5	28,5
Canada	229,5	135,2	1,2	5,5	5,4	0,8	24,0	10,5	318,9	23,8
Japon	104,0	–	0,7	3,9	1,1	0,3	3,0	2,0	98,1	6,4
Nouvelle-Zélande	372,2	–	3,3	8,3	2,5	?	23,9	31,4	372,9	25,2
Turquie	134,5	96,4	0,3	?	?	?	10,2	5,9	161,1	11,7
Etats Unis	345,3	?	0,8	3,3	4,3	5,0	29,5	5,5	360,4	24,2
Grèce	207,4	?	3,0	0,6	28,5	?	61,9	4,4	400,5	30,8

Notes: – = quantité nulle ou insignifiante.
? = pas de données.
[1] Les données relatives à l'Allemagne se rapportent à l'ex-RFA.
Source: OCDE, 1991.

FIGURE 23
Consommations moyennes de protéines totales et de protéines végétales dans différents pays



Source: Schürch, 1972.

(amélioration de la digestibilité des protéines du lait, effet thérapeutique sur la diarrhée infectieuse, réduction de la cholestérolémie, ainsi que digestibilité accrue du lactose).

La consommation alimentaire du sujet moyen dans les pays industrialisés (hormis le Japon) assure à peu près ses besoins calciques. Un apport similaire est loin d'être possible dans les pays en développement. Divers auteurs attribuent au calcium présent dans certains végétaux des qualités nutritives remarquables, capables de suppléer l'insuffisance de calcium animal dans l'alimentation traditionnelle. D'autres auteurs contestent ce point de vue. Le lait et les laitages peuvent aussi contribuer à l'apport vitaminique et, dans les pays industrialisés, la couverture en vitamines

liposolubles est surtout tributaire de la consommation de beurre. Le lait constitue, en outre, une source de vitamines B (une consommation quotidienne d'un litre de lait couvre les besoins en vitamine B de l'adulte).

POSSIBILITÉS DE CONSOMMATION CHEZ LE SUJET MALADE

Le lait et les produits laitiers continuent d'être consommés par le sujet malade. Ils trouvent au cours de certaines affections une place particulière. Deux types de situations où l'administration de laitages est susceptible de donner lieu à des difficultés sont la diarrhée infectieuse et la malnutrition grave, affections qui souvent se renforcent mutuellement.

Importance du yaourt et des laits fermentés au cours des infections digestives

Diverses raisons expliquent l'efficacité du yaourt et des laits fermentés au cours des infections digestives. L'importance préventive de l'acidité pour sauvegarder l'hygiène a déjà été évoquée. L'effet curatif du yaourt sur des infections digestives bactériennes a été démontré pour différents germes, chez l'animal comme chez l'être humain. Les entérites à *Salmonella* ou *Shigella* semblent plus rapidement amendées chez les enfants nourris au yaourt que chez les enfants recevant du lait. L'administration de ferments (*Lactobacillus*) améliore très sensiblement l'état de patients souffrant d'infections récurrentes à *Clostridium* avec diarrhée sanglante rebelles aux traitements médicamenteux. La présence d'acide lactique explique en partie cette action inhibitrice sur le développement de certaines souches bactériennes, notamment pathogènes. D'autres substances produites en quantités nettement plus faibles (en particulier peroxyde d'hydrogène, probiotiques et antibiotiques) jouent aussi un rôle protecteur vis-à-vis de la croissance des bactéries pathogènes.

Emploi du lait en situation de malnutrition grave

Raisons d'être et modalités d'emploi du lait. Le kwashiorkor de l'enfance s'accompagne d'une atteinte souvent grave de la muqueuse intestinale et, de ce fait, d'une diminution prononcée des activités enzymatiques des cellules de la paroi intestinale (disaccharidases) (Rosenberg et Schrimshaw, 1972;

Viteri et Schneider, 1974; Gendrel *et al.*, 1984; Brasseur, 1986). Bien qu'à cet âge on s'attende à trouver encore une activité lactasique, celle-ci a de fait disparu, et sans doute définitivement. Les formes plus atténuées de malnutrition protéinoénergétique entraînent ou accompagnent toujours un certain degré de lésion de la muqueuse digestive.

Malnutrition et infection allant souvent de pair, il n'est pas facile d'identifier la part exacte des différents mécanismes qui enclenchent et entretiennent le cercle vicieux infection-malabsorption-malnutrition (Gershwin, Beach et Hurley, 1985; Chandra, 1988; O'Keefe *et al.*, 1991). Dans les cas où les atteintes intestinales morphologiques et fonctionnelles sont installées, voire irréversibles, la place du lait et des produits laitiers doit être définie. Un débat de fond oppose les théoriciens, réticents à proposer du lactose chez les sujets diarrhéiques et lactase-déficients, aux cliniciens qui, sur le terrain, obtiennent avec le lait ou ses dérivés des succès indéniables dans le traitement d'enfants gravement carencés. La question est parfois posée en d'autres termes: «Faut-il soigner la diarrhée ou l'enfant?». Sans aucun doute, l'éviction du lactose du régime d'un enfant atteint de malnutrition réduit la fréquence et le volume de ses selles, mais n'accélère en rien sa guérison. De nombreuses études ont, en effet, apporté la preuve que le lait entier, demi-écrémé ou écrémé est utile dans le traitement diététique de la malnutrition grave, même si une malabsorption du lactose est mise en évidence. De fait, les autres nutriments, notamment azotés et lipidiques, continuent d'être absorbés normalement.

On dispose de peu d'études effectuées chez des enfants intolérants au lactose moins sévèrement carencés. Au Bangladesh, un mélange de caséine et d'huile enrichi en glucose ou en lactose a été donné en supplément aux différents repas pendant une douzaine de jours à des enfants en apparente bonne santé présentant un poids allant, selon l'âge, de 74 à 108 pour cent de la médiane de référence NCHS (Brown, 1981). On a observé des gains de poids comparables pour les deux régimes supplémentés ainsi que des pertes fécales peu augmentées avec le lactose, les régimes étant bien acceptés et tolérés. Il a donc été conclu que le lait en petite quantité réparti dans les principaux repas habituels est bien toléré chez les jeunes enfants lactose-intolérants; toutefois, celui-ci ne doit pas constituer la seule source d'éner-

gie. En outre, le lait doit être introduit très progressivement et le volume des selles doit être contrôlé pour s'assurer que le supplément est bien absorbé (une excrétion fécale trop importante traduirait des pertes énergétiques élevées).

La question de savoir si, chez l'enfant en bonne santé apparente, le multiparasitisme interfère ou non avec l'utilisation du lactose a, jusqu'à présent, reçu des réponses contradictoires, comme le témoignent les efforts de plusierus équipes de chercheurs (Brasseur, 1986; Gendrel et al., 1990). Chez l'enfant souffrant de malnutrition grave, l'activité lactasique intestinale est effondrée, et ne se rétablit pas après récupération nutritionnelle (Vis, Yourassowksy et Van der Borght, 1975). La diarrhée par elle-même semble aussi entraîner une diminution des disaccharidases intestinales (Lifshitz et Nichols,1990). L'absorption du lactose est réduite par des infestations telles que celles provoquées par des *Ascaris* ou des *Giardia*. Ces recherches prouvent l'intérêt que l'on porte à l'étude de l'absorption du lactose chez des enfants souffrant de malnutrition et/ou diarrhéiques.

A titre d'exemple, le tableau 70 illustre comment insérer le lait dans un régime complet destiné à réalimenter des enfants atteints de malnutrition protéine-énergétique grave. La réalimentation de l'enfant sévèrement malnutri est appelée alimentation thérapeutique. Elle ne peut être réalisée que sous surveillance médicale. Elle se fait progressivement pour aboutir en quelques jours à un régime à haute densité énergétique. La présentation détaillée de ce processus dépasse le cadre de cet ouvrage et a fait l'objet de publications spécialisées.

Certains auteurs suggèrent de proposer au jeune enfant un supplément de 25 ml/kg/jour de lait entier ou d'un produit équivalent non lactosé, constitué de caséine, d'huile végétale et de glucose ou saccharose (tableau 71). L'emploi de lait fermenté permet d'abaisser son contenu en lactose de moitié, ce qui contribue à une meilleure tolérance chez les enfants souffrant de diarrhée et de malnutrition (Dewit *et al.*, 1987). En outre, on a constaté chez des enfants malnutris une bonne tolérance au yaourt (conservé en poudre) par rapport au lait (Gendrel et al., 1990). Il a été signalé, toutefois, que si cette poudre se conserve de nombreux mois à des températures inférieures à 20 °C en boîtes scellées, elle ne reste pas consommable

TABLEAU 70

Exemple de réalimentation d'un enfant de 10 kg souffrant de malnutrition protéino-énergétique grave

	Régime progressif						Régime de croisière	
	Jours de réalimentationion							
	1	2	3	4	5	6	et au-delà	
Aliments								
Solution glucose électrolyte	....	....	à volonté	....	....	Arrêt		
Lait demi-écrémé *(ml)*	–	50	70	90	110	130		
Haricots *(g)*	–	–	–	100	100	200		
Riz cuit *(g)*	–	100	100	200	200	200		
Huile de palme *(ml)*	–	–	–	30	30	30		
Sucre *(g)*	–	–	50	50	50	50		
Banane (g)	–	–	200	200	200	200		
Nutriments							(a)	(b)
Energie *(kcal)*	–	261	554	1 235	1 245	1 525	4	–
Protéines *(g)*	–	4,8	7,5	35	35	60	8	16
Lipides *(g)*	–	0,75	1,05	33	33	34	6	20
Glucides *(g)*	–	60	130	200	200	240	3	64
Calcium *(mg)*	–	83	132	284	308	440	37	–
Fer *(mg)*	–	0,1	1,1	7,6	7,6	14	0,5	–

(a) Part (%) de l'apport du lait dans l'apport nutritionnel.
(b) Répartition (%) de l'énergie entre nutriments énergétiques.

lorsqu'elle est conservée à des températures plus élevées. Ces impératifs de conservation empêchent l'usage à grande échelle de ces produits.

Si les avantages nutritionnels du lait sont clairs, il ne faut pas pour autant oublier certaines de ses lacunes qui sont d'autant plus manifestes que le lait est utilisé comme aliment exclusif pour réalimenter des sujets gravement carencés. Le cas des déficits en cuivre démasqués chez des enfants chiliens en phase de récupération nutritionnelle et alimentés au seul lait entier l'illustre clairement (Cordano, Baerth et Graham, 1964). En situation de

TABLE 71

Exemple de solution de gavage artisanale utilisée dans les pays en développement pour réalimenter les enfants atteints de malnutrition protéino-énergétique (pour 100 ml)

	Quantité *(g)*	Energie *(kcal)*	Protéines *(g)*	Lipides *(g)*	Glucides *(g)*
Poudre de caséine	4,1	14,0	3,5	–	–
Huile végétale	3,5	31,5	–	3,5	–
Glucose ou saccharose	5,0	20,0	–	–	5
Total	–	65,5	3,5	3,5	5
Répartition énergétique *(%)*			21	48	31

carence protéinoénergétique (donc en macronutriments), il existe toujours des déficits en micronutriments (minéraux, vitamines, oligo-éléments). Selon les régions du monde et en fonction du contexte socio-économique local, on observera des carences en un ou plusieurs nutriments, notamment en vitamine A, en fer, en iode, en zinc et en vitamine D. Ces insuffisances doivent être connues de manière à donner aux problèmes nutritionnels particuliers à chaque région une solution adaptée et efficace. En d'autres termes, si le lait (entier) assure une bonne couverture protéique et énergétique, l'apport en nutriments mineurs mais toujours aussi essentiels est aléatoire.

Réponses aux tenants de l'éviction du lactose. La question de l'inclusion de quantités importantes de poudre de lait provenant des excédents de production des pays occidentaux dans des programmes d'aide alimentaire destinés aux jeunes enfants a fait l'objet de vifs débats. Certains se sont posés la question de leur adaptation vis-à-vis de populations qui, pour la plupart, sont intolérantes au lactose. Selon Scrimshaw et Murray (1988), ces programmes n'ont pas occasionné de problèmes majeurs chez leurs bénéficiaires. Pour ces auteurs, «il est scientifiquement injustifié et socialement irresponsable de suggérer que le lait et les produits laitiers ne sont pas

appropriés à des sujets qui digèrent mal le lactose». L'argument principal utilisé est que «le Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF) et les organisations non gouvernementales (ONG) ont distribué des quantités énormes de lait en poudre au cours de ces quarante dernières années sans problèmes d'acceptabilité à long terme. Bien au contraire, la contribution potentielle des produits laitiers à l'apport alimentaire en protéines, riboflavine et calcium en font des produits nutritionnellement précieux». Dans le cas de la récupération nutritionnelle des enfants carencés, ces auteurs affirment que l'utilisation de lait ne doit pas être découragée tant qu'il constitue la source la meilleure et la moins chère de protéines de haute qualité, à l'exception des cas de diarrhées sévères. En effet, les tests d'intolérance sont mesurés après une ingestion unique et importante de lactose. Toutefois, lorsque la consommation de lait est répartie en plusieurs fois au cours de la journée, de façon progressive et régulière, on note une bien meilleure tolérance chez les sujets intolérants lors du test de provocation.

Si l'on doit néammoins tenir compte de l'intolérance au lactose, la plupart des auteurs recommandent l'emploi d'un lait appauvri en lactose afin d'éviter une diarrhée inutile par malabsorption des glucides. La réduction de la charge en lactose du lait est coûteuse lorsqu'on tente de l'obtenir par des procédés industriels (addition de ß-galactosidase). Des moyens plus simples, parfois rudimentaires, permettent d'atteindre ce même but (lait acidifié et caillé).

Le lait et le yaourt dans les régimes alimentaires

La grande variété des produits laitiers permet l'intégration de ceux-ci dans la majorité des régimes alimentaires conditionnés par différentes pathologies. Les régimes les plus souvent prescrits – régime pauvre en sel, régime amaigrissant, régime pauvre en résidus, régime pauvre en cholestérol – s'accommodent très bien de produits laitiers judicieusement choisis. Ainsi, pour un régime pauvre en sel (mais pas pour un régime désodé strict), on peut maintenir lait et yaourt, mais il faudra proscrire les fromages à pâte molle ou dure; de même, des produits écrémés peuvent faire partie d'un régime

amaigrissant ou pauvre en cholestérol. Ces questions dépassent le cadre de cette publication, mais sont traitées dans les manuels de diététique.

PROBLÈMES D'INTÉGRATION DES PRODUITS LAITIERS DANS L'ALIMENTATION HABITUELLE

Il existe un certain nombre de situations où la consommation de lait humain et/ou animal peut s'avérer défavorable et même dangereuse. Ces cas dus à des causes assez variées sont quantitativement plutôt rares. Les situations à risque vital sont surtout le propre de l'enfant alors que, chez l'adulte, les troubles se présentent d'ordinaire de manière beaucoup plus insidieuse et chronique.

Problèmes particuliers du nourrisson et du jeune enfant

Quelques maladies métaboliques rares, congénitales, s'accompagnent d'une intolérance assez caractéristique (mais pas toujours spécifique) au lait. Par contre, un nombre apparemment élevé et sans doute croissant de nourrissons manifestent une allergisation vis-à-vis des protéines lactées animales. On réserve actuellement le terme d'intolérance aux affections causées par un déficit enzymatique affectant la digestion des glucides, alors que le terme d'allergie est utilisé pour définir les manifestations causées par un dérèglement immunitaire.

Maladies liées à la consommation du lactose. L'absence d'enzymes liées à l'hydrolyse du lactose et au métabolisme des produits de cette hydrolyse conduit à des maladies congénitales. Deux d'entre elles, l'alactasie congénitale (maladie très rare) et le déficit en transporteur glucose-galactose, se manifestent par une diarrhée grave qui entraîne rapidement la déshydratation puis la dénutrition et le décès. La troisième (galactosémie congénitale) correspond à l'absence d'une enzyme assurant dans le foie la conversion du galactose en glucose. Elle se traduit par un ictère et une cirrhose qui conduit rapidement au décès. Quand les nourrissons sont atteints de l'une de ces trois maladies, il faut bannir le lactose de leur alimentation.

L'hypolactasie transitoire est due à la diminution de l'activité lactasique qui a pour cause la déterioration des villosités et de la bordure en brosse de

l'intestin par suite d'une infection digestive; tant que les cellules de la muqueuse intestinale ne sont pas réparées, le lactose sera mal toléré.

Maladies liées à la teneur lipidique du lait. Un nombre croissant d'affections métaboliques mettant en cause une incapacité à métaboliser certains acides gras sont décrites dans la littérature médicale récente. Leur fréquence est faible, mais souvent leur traitement diététique n'autorise pas la consommation de lait humain ou animal.

Maladies liées à la teneur protéique du lait

Aminoacidopathies. Plusieurs maladies par déficit enzymatique se caractérisent par l'incapacité de métaboliser l'un ou l'autre des acides aminés (la phénylcétonurie en est l'exemple le plus connu). Dans ces situations, l'acide aminé ou certains dérivés anormaux peuvent s'accumuler et présenter un caractère toxique pour l'organisme. L'allaitement maternel et plus généralement toute consommation de protéines lactées animales sont souvent contre-indiqués (Bahna et Heiner, 1980; Brostoff et Challacombe, 1984; Chiaramonte, Schneider et Lifshitz, 1988; Chandra, 1988; Scriver *et al.*, 1989).

Allergie aux protéines du lait de vache. Une frange de la population est, semble-t-il, génétiquement prédisposée aux manifestations allergiques (sujets dits à «tendance atopique»). Dans les pays d'Europe ou d'Amérique du Nord, le pourcentage estimé s'élève à quelques pourcents de la population infantile (de 1 à 4 selon Kjellman, 1988). Ces sujets sont enclins à l'allergisation aux protéines animales, notamment la ß-lactoglobuline bovine, mais aussi caprine, par exemple. Les caséines et l'a-lactalbumine présentent aussi des caractères allergéniques, mais sans doute moindres. Les processus industriels de transformation alimentaire pourraient exacerber le caractère immunogène et sensibilisant de certaines protéines lactées. Le lait humain, par contre, semble bien être, dans cette problématique immunologique, l'aliment le plus neutre.

Outre une prédisposition primitive d'ordre génétique (et donc à caractère familial) vis-à-vis de l'allergie (souvent définie par le terme «atopique»), une allergisation peut aussi survenir secondairement. Suite à un épisode de

gastro-entérite infectieuse (diarrhée épidémique à rotavirus, par exemple), la muqueuse intestinale peut se trouver abîmée. Les lésions augmentent la perméabilité digestive et favorisent la pénétration de (fragments de) protéines intactes, lactées notamment (Jalone *et al.*, 1991). Une allergie aux protéines du lait de vache faisant suite à une infection intestinale n'est pas une complication rare de l'épisode gastro-entéritique. Elle se manifeste alors par l'impossibilité de réintroduire le lait au décours de la maladie diarrhéique. On a souvent tendance à attribuer ces difficultés diététiques à une intolérance transitoire au lactose sur hypolactasie post-infectieuse (voir plus haut). Des analyses de laboratoire (IgE, RAST, IgG spécifiques) permettent de faire la part des choses entre une allergie aux protéines et une intolérance au disaccharide.

Risque de rachitisme hypovitaminique. Les laits animaux sont pauvres en vitamine D. En outre, la teneur en phosphates de la plupart des laits animaux consommés en nutrition humaine est élevée. La charge de phosphates et l'incapacité de fixer le calcium sur l'os en l'absence de vitamine D favorisent une fuite phosphocalcique rénale parfois énorme. La conjonction d'un apport vitaminique adéquat (400 UI de vitamine D2) et de minéraux (calcium et phosphore) en proportions équilibrées (rapport 1,5 à 2:1) rétablit la situation (Goel et Arneil, 1985).

Affections liées à la consommation excessive de lait et/ou de dérivés lactés. Une consommation exagérée de lait et de produits lactés (yaourts, fromages blancs, petits suisses), courante dans les pays industrialisés, provoque surtout chez les jeunes nourrissons une surcharge azotée rénale, détectable par un taux d'urée plasmatique élevé, et se traduit parfois par des distorsions très marquées de l'aminogramme plasmatique (augmentation notable du taux de phénylalanine). Toutefois, les répercussions de ces anomalies en termes de santé restent jusqu'à présent mal connues.

Problèmes de l'adulte

Les risques potentiels d'une consommation importante de lait et de produits laitiers se situent, chez l'adulte, à quatre niveaux:

- hypolactasie et malabsorption calcique menant entre autres à l'ostéoporose du vieillard;
- excès de lipides saturés et maladies vasculaires occlusives;
- excès de sodium et hypertension artérielle;
- risque accru de cataracte.

L'existence de ces affections a été mise en évidence par des études épidémiologiques menées essentiellement dans les pays industrialisés. Ces affections ne correspondent pas à un risque important dans les pays en développement, car elles adviennent à un âge avancé ou en cas de consommation importante de produits laitiers, conditions qui, dans ces cas, ne sont pas rassemblées. En ce qui concerne les trois premières, les facteurs de possibles dérèglements des métabolismes impliqués ont été cités dans les chapitres précédents. On évoquera ci-après le rôle du lait et des produits laitiers dans un risque accru de cataracte.

Le lactose est source de galactose, qui entre pour une faible part dans les galactolipides de structure et dont le reste est converti par le foie en glucose. Cette réaction réversible et un apport massif de lactose alimentaire générateur de galactose permettraient la transformation d'une faible quantité de ce galactose en galacticol. Cette substance accumulée dans le cristallin pourrait favoriser la survenue de cataractes. Cette éventualité reste au rang des hypothèses. La consommation de produits laitiers coïncide avec une incidence élevée de cataracte parmi les personnes âgées. Le lait et le yaourt tiendraient à cet égard la même place.

Risques de maladie infectieuse inhérents à la consommation de lait

Le lait n'est pas une sécrétion entièrement stérile, quelle que soit l'espèce considérée. La tétée constitue sans doute au plan bactériologique le moyen le plus hygiénique de prendre du lait: les microbes potentiellement présents n'ont pas le temps de proliférer. Seule l'infection de la glande mammaire (mammite, le plus souvent à Staphylocoque doré) représente une situation à risque de charge microbienne majeure.

Dès que le lait est stocké, le risque de prolifération microbienne augmente et ce d'autant plus qu'une contamination peut survenir au cours d'un processus industriel long et complexe. Dans certaines circonstances (fabri-

TABLEAU 72
Micro-organismes plus particulièrement retrouvés dans le lait cru

Micro-organismes	Lait humain	Lait de vache	Lait de chèvre
Streptococcus agalactiae	+	+	+
Staphylococcus aureus	+	+	+
Escherichia coli	+	+	+
Salmonella	–	+	+
Listeria monocytogenes	–	+	+
Bacillus tuberculosis	Koch	Bovine	Caprine
Brucella	–	–	+
Clostridium perfringens	–	+	+
Campylobacter	–	+	+
Yersinia enterocolitica	–	+	+

Source: Alais, 1984.

cation de yaourts et de fromages), le développement contrôlé de souches bactériennes spécifiques fait partie du procédé de fabrication. Un dérapage et une pullulation de souches pathogènes est possible dans ces circonstances et un contrôle bactériologique est requis. Enfin, certains agents infectieux sont plus particuliers à certaines espèces animales (tuberculose bovine, fièvre de Malte ou brucellose) et une surveillance vétérinaire du cheptel laitier est indispensable parce qu'elle seule permet une garantie de qualité microbiologique (tableau 72).

PERSPECTIVES D'INTÉGRATION DES PRODUITS LAITIERS DANS L'ALIMENTATION HABITUELLE DU JEUNE ENFANT ET DE L'ADULTE

Stratégie d'intégration

Une stratégie d'intégration judicieuse des laitages peut être conçue de deux manières. Une première possibilité est d'apporter aux sujets peu ou mal nourris le maximum de lait compatible avec une bonne tolérance clinique (absence de symptôme) et, de surcroît, avec un degré d'acceptabilité qui tienne compte des coutumes alimentaires. Le niveau d'apport souhaité ou

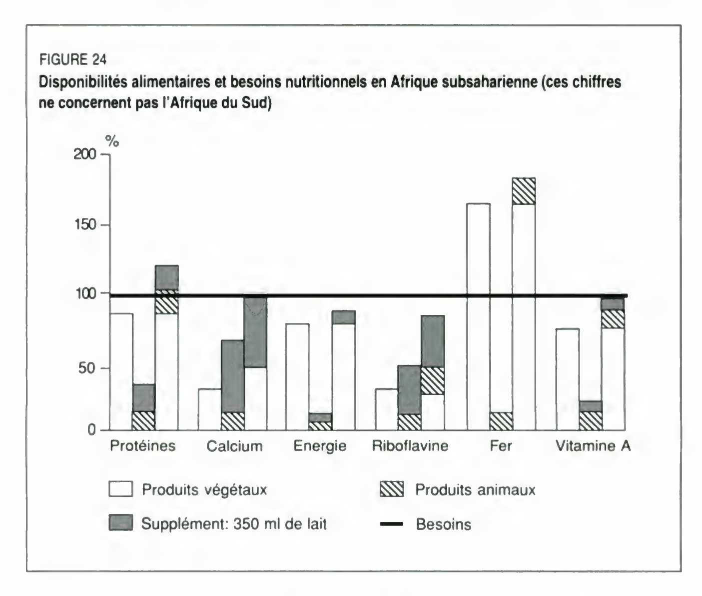


FIGURE 24

Disponibilités alimentaires et besoins nutritionnels en Afrique subsaharienne (ces chiffres ne concernent pas l'Afrique du Sud)

conseillé est alors fixé par le maximum de tolérance. Ce premier concept règle certains problèmes des pays producteurs lorsqu'on sait les surplus de produits laitiers accumulés dans certaines régions du monde. Une autre possibilité est de calculer la quantité minimale de produits laitiers qui comble les lacunes en nutriments essentiels de l'alimentation ordinaire. Le second concept risque de mieux s'harmoniser avec les pratiques alimentaires du lieu, qu'il faut avant tout connaître.

La comparaison de la composition du lait avec les besoins en nutriments montre que le lait n'est pas un aliment complet et ne peut être un aliment exclusif. Son intégration n'est harmonieuse qu'en combinaison avec d'autres aliments choisis judicieusement pour établir un équilibre nutritionnel. La manière d'atteindre cet équilibre dépend de deux facteurs: d'une part, des

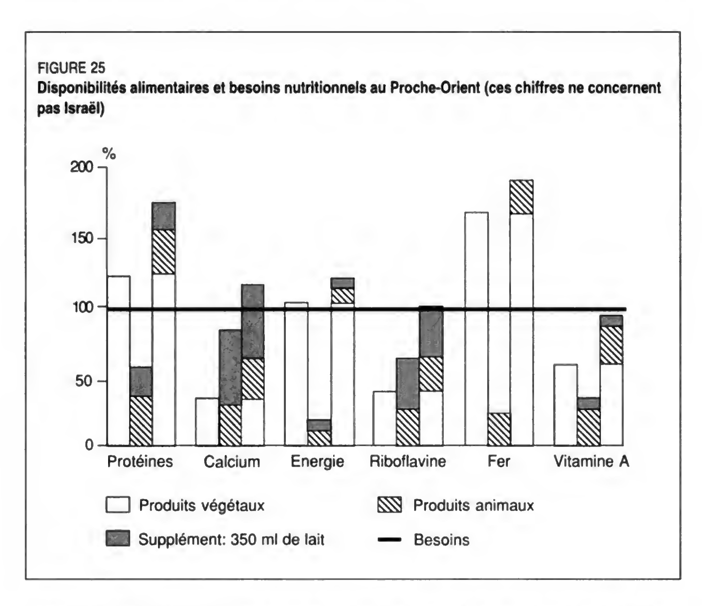


FIGURE 25
Disponibilités alimentaires et besoins nutritionnels au Proche-Orient (ces chiffres ne concernent pas Israël)

besoins de l'individu (variables en fonction de l'âge) et, d'autre part, des complémentarités alimentaires (changeantes surtout selon les régions).

Perspectives d'une meilleure utilisation selon les régions du monde

Pour aborder le point de la complémentarité des produits laitiers, il convient de connaître les possibilités alimentaires dans les grandes régions du monde. Dans ce but, la FAO a établi des bilans de disponibilités alimentaires par région que l'on peut comparer aux principaux besoins nutritionnels (figures 24 à 27). Cette comparaison pour l'Amérique du Nord, l'Europe occidentale et orientale, et l'Océanie montre qu'un équilibre nutritif est atteint. Promouvoir la consommation de lait n'a pas d'intérêt dans la mesure où celui-ci est visiblement déjà très utilisé. L'analyse des données chiffrées se rapportant aux régions d'Afrique, du Proche-Orient, d'Extrême-Orient et d'Amérique

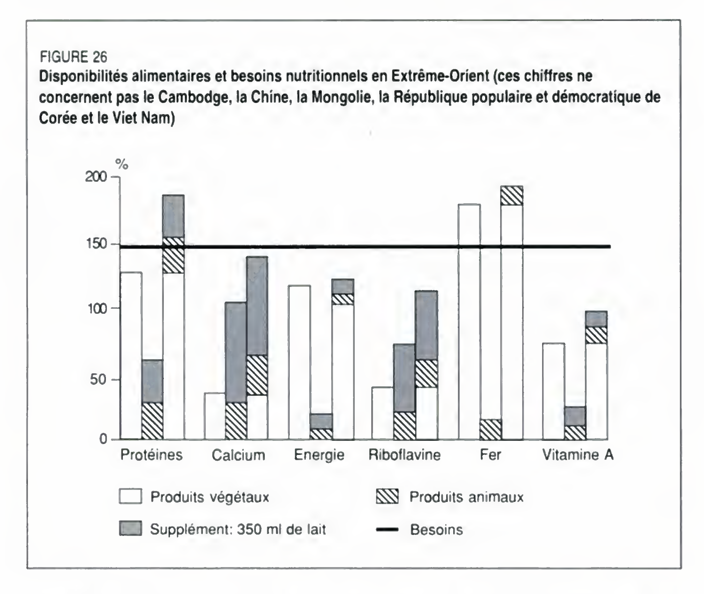
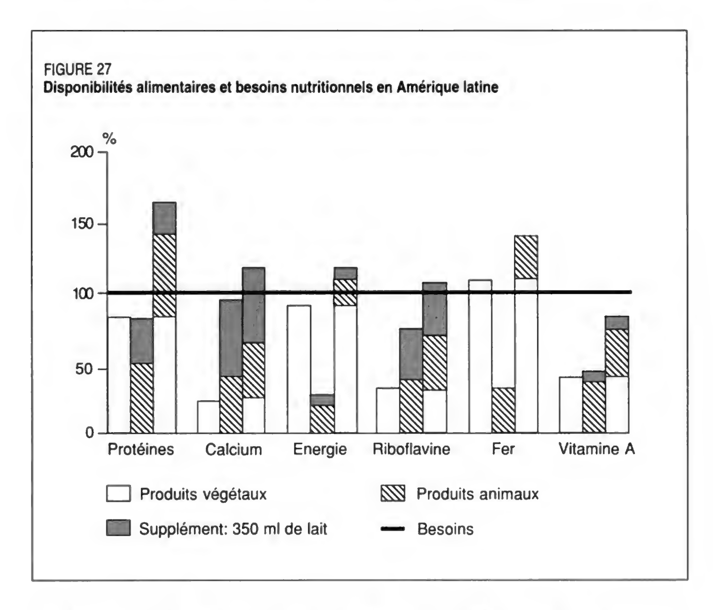


FIGURE 26
Disponibilités alimentaires et besoins nutritionnels en Extrême-Orient (ces chiffres ne concernent pas le Cambodge, la Chine, la Mongolie, la République populaire et démocratique de Corée et le Viet Nam)

latine dévoile que l'apport lacté qui comblerait le déficit en calcium oscille de 250 à 400 ml. Une telle pratique permettrait de rehausser un apport protéique apparemment acceptable, mais essentiellement végétal, donc de fait assez médiocre.

L'introduction d'une certaine quantité de lait améliorerait la couverture des besoins nutritionnels de la manière suivante. Dans les régions du monde où la disponibilité des produits laitiers est particulièrement faible et l'apport protéique animal généralement insuffisant, on observe que la consommation quotidienne d'un tiers de litre de lait de vache ajouté à l'alimentation habituelle apporterait des quantités appréciables de protéines, de calcium, de phosphore et même d'énergie, mais contribuerait pour une quantité négligeable aux besoins en vitamines, en oligo-éléments et en acides gras essentiels. Seule dans cette catégorie, la riboflavine fait exception, assurant

FIGURE 27
Disponibilités alimentaires et besoins nutritionnels en Amérique latine



toujours plus de la moitié des apports souhaitables. Dans une moindre mesure, la présence d'acide folique présente également un intérêt pour les plus jeunes. Il faut enfin signaler l'apport médiocre de fer de cette source animale qu'est le lait.

Dans les mêmes régions, une consommation de 45 à 65 g de fromage à pâte dure (type Hollande) plutôt que de lait permet, pour un apport équivalent de calcium, de mieux fournir la vitamine A, la riboflavine et le zinc. D'une manière plus générale, la consommation d'une quantité ordinaire (80 g/jour) de fromage à pâte dure (type Hollande) présente un intérêt nutritionnel évident. Outre les caractéristiques nutritives du lait de vache, son dérivé fromager contient en supplément des taux appréciables de zinc et de vitamine A. Ces deux carences (parfois combinées et associées au sein du métabolisme) sont largement répandues dans les pays défavorisés. Il faut

noter aussi qu'aucun produit ou dérivé laitier n'apporte en suffisance les acides gras essentiels.

Ce qui précède illustre de quelle manière l'adjonction de lait ou de produits laitiers peut corriger certains déficits en nutriments d'une diète habituelle. Toutefois, tout effort de promotion d'un aliment doit tenir compte de la disponibilité en cet aliment, de celle des autres aliments, des habitudes alimentaires, de l'épidémiologie ainsi que des désordres nutritionnels. Chaque situation est particulière et tout effort de promotion d'un aliment, ici du lait, doit s'ajuster à cette situation en s'appuyant sur les caractéristiques nutritionnelles de cet aliment et donc sur l'intérêt qu'il présente pour améliorer la situation alimentaire considérée.

Bibliographie

Adrian, J. & Lepen, B. 1987. Le lactose. *In:* CEPIL. *Le lait matière première de l'industrie alimentaire,* p. 99-111. Paris, INRA.

Adrian, J. 1973. Valeur alimentaire du lait. Paris, La Maison Rustique.

Alais, C. & Blanc, B. 1975. Milk proteins: biochemical and biological aspects. *Wrld Rev. Nutr. Diet,* 20:67-147.

Alais, C. 1984. Science du lait - principes des techniques laitières. Paris, Editions Sepaic. 4[e] éd. 814 pages.

Anifantakis, E.M. 1986. Comparison of the physico-chemical properties of ewe's and cow's milk. *Bull. Intern. Dairy Fed.* 202:42-53.

Arai, K., Murota, I., Hayakawa, K., Kataoka, M. & Mitsuoka, T. 1980. Effects of administration of pasteurized fermented milk to mice on the lifespan and intestinal flora. *Jap. Soc. Food Nutr.,* 33:219-223.

Atkinson, S.A. & Lonnerdal, B. 1989. *Protein and non-protein nitrogen in human milk.* Boca Raton, CRC Press. 249 pages.

Bahna, S.L. & Heiner, D.C. 1980. *Allergies to milk.* New York, Grune and Stratton. 202 pages.

Berger, H. 1988. *Vitamins and minerals in pregnancy and lactation.* New York, Raven Press.

Bernier, J.J., Adrian, J. & Vidon, N. 1986. *Les aliments dans le tube digestif.* Paris. 468 pages.

Blanc, B. 1981. Biochemical aspects of human milk - Comparison with bovine milk. *Wrld Rev. Nutr. Diet.,* 36:1-89.

Boudraa, G., Touhami, M., Pochart, P., Soltana, R., Mary, J.Y. & Desjeux, J.F. 1990. Effect of feeding yogurt versus milk in children with persistent diarrhea. *J. Pediatr. Gastroenterol. Nutr.,* 11:509-512.

Bourgeois, C.M., Mescle, J.F., Zucca, J. & Larpent J.P. 1989. *Microbiologie alimentaire.* 2 volumes. Paris, Technique et Documentation, Lavoisier.

Brasseur, D. 1986. *Influence de la malnutrition protéo-énergétique sur l'expression génétique de la lactase*. Université libre de Bruxelles. (Thèse)

Braun, O.H. 1981. Effect of consumption of human milk and other formulas on intestinal bacterial flora in infants. *In* E. Lebenthal, ed. *Textbook of gastroenterology and nutrition in infancy*, vol. 1, p. 247-256. New York, Raven Press.

Brostoff, J. & Challacombe, S.J. 1984. Food all-infected preschool children. *Am. J. Clin. Nutr.*, 39:255-264.

Brown, K.H. 1981. Milk supplementation of children in the tropics. In *Lactose digestion: clinical and nutritional implications*. Baltimore, Johns Hopkins University Press.

Bruce, A. & Slorach, S.A. 1987. Dietary implications of radioactive fallout in Sweden following the accident at Chernobyl. *Ann. J. Clin. Nutr.*, 45:1089-1093.

Bunge, G. 1898. *Lehrbuch des physiologischen Chemie*. Leipzig. 4th Ed.

Canfield, L.M. & Hopkinson, J.M. 1989. State of the art: vitamin K in human milk. *J. Pediatr. Gastroenterol. Nutr.*, 8:430-441.

Centre interprofessionnel de documentation et d'information laitières. 1998. Documents divers. Paris, CIDIL.

Centre national interprofessionnel de l'économie laitière. 1989. *L'économie laitière en chiffres*. Paris, CNIEL.

CEPIL. 1987. *Le lait matière première de l'industrie laitière*. Paris, INRA.

Cordano, A., Baerth, J.M. & Graham, G.G. 1964. Copper deficiency in infancy. *Pediatrics*, 34:324-327.

Coste, M. & Tome, D. 1991. Milk peptides with physiological activities. II. Opioid and immunostimulating peptides derived from milk proteins. *Lait*, 71:241-247.

Chandra, R.K. 1988. *Nutrition and immunology*. New York, Liss AR. 342 pages.

Chiaramonte, L.T., Schneider, T.A. & Lifshitz, F. 1988. *Food allergy*. New York, Dekker. 482 pages.

Dahlberg, A.C. 1932. *The margin of safety between the thermal death point of the tuberculose bacillus and the thermal cream layer volume impairement in pasteurizing milk at various temperatures*. Geneva, N.Y.(New York State Agricultural Experiment Station, Technical Bulletin N°203).

Dahlberg, A.C. 1946. *High-temperature short-time pasteurization*. p.34-40. East Lansing, Mich., (Michigan State College Agricultural)

Dahlqvist, A. 1984. Lactose inlolerance. *Nutr. Abstr. Rev. Clin. Nutr.*, 54:649-658.

Dalgleish, D.G. 1982. Milk proteins, chemistry and physics. *In:* P.F. Fox & J.J. Condon, eds. *Food proteins*, p. 155-178. London, Applied Sciences Publication.

Dash, P.C. & Basu, S.B. 1976. Milking behaviour of Murrah buffaloes. *Indian J. Dairy Sci.* 29:113-116.

De Simone, C., Tzantzoglou S., Baldinelli, L., Di Fabio, S., Bianchi Salvadori, B., Jirillo, E. & Vesely R. 1988. Enhancement of host resistance against *Salmonella typhimurium* infection by a diet supplemented with yogurt. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.* 10:279-284.

Debry, G. & Feron, R. 1976. Evolution de la consommation humaine de protéines au cours des dix dernières années (1965-1974). *Am. Nutr. Alim.*, 30, 161-173.

Delmont, J. 1983. *Milk intolerance and rejection.* Basel, Karger. 169 pages.

Dewit, O., Boudraa, G., Touhami, M. & Desjeux, J.F. 1987. Breath hydrogen test and stools characteristics after ingestion of milk and yogurt in malnourished children with chronic diarrhea and lactase deficiency. *Trop. Pediatr.*, 33:177-80.

Doreau, M. & Boulot, S. 1989. Methods of measurements of milk yield and composition in nursing mares: a review. *Lait*, 69:159-171.

Doreau, M. 1991. *Le lait de jument.* INRA Prod. Anim. 4:297-302.

Drogoul, C. 1989. *Etude bibliographique de la composition et propriétés diététiques et thérapeutiques du lait de jument.* INRA.

Dubey, A.R. & Gupta, S.C. 1988. A formula to standardize buffalo milk based on energy value. *Ind. J. Anim. Sci.* 58:147-149.

Eck, A. 1990. Le fromage. 2e édition. Technique et Documentation, Lavoisier, Paris. 539 pages.

ESPGAN. 1981. Committee on Nutrition. Guidelines on infant nutrition II. Recommandations for the composition of follow-up formulae and beikost. *Acta Paediatr. Scand.*, 5:287.

ESPGAN. 1990. Committee report. Comment on the composition of cow's milk based follow-up formulas. *Acta. Paediatr. Scand.*, 79:250-254.

FAO. 1977. *The water buffalo.* Rome, FAO.

FAO. 1990. *Annuaire FAO de la production*, vol. 44. Rome, FAO.

FAO/OMS. 1973, 1977, 1985. *Codex Alimentarius.* Code de principes concernant le lait et les produits laitiers. Normes internationales pour les produits laitiers et normes internationales individuelles pour les fromages.

FIL. 1981. The composition of ewe's and goat's milk. *Bull. Intern. Dairy Fed.*, 140:5-19.

Fox, P.F., & Condon J.J. 1982. *Food proteins.* London, Applied Sciences Publication.

Ganguli, N.C. & Kuchroo, C.N. 1979. Humanized buffalo milk for infants - A success story. *Indian Dairyman*, 31:691-694.

Gendrel, D., Gahouma, D., Ngou-Mihama, E., Nardou, M., Chamlian, A. & Philippe, E. 1984. Anomalies de la muqueuse jéjunale et malnutrition protéino-calorique chez le nourrisson en Afrique équatoriale. *Ann. Pédiat.*, 31:871-876.

Gendrel, D., Richard-Lenoble, D., Dupont, C., Gendrel, C., Nardou, M. & Chaussain, M. 1990. Utilisation d'un lait fermenté en poudre chez l'enfant malnutri ou intolérant au lactose. *Presse Méd.* 15:700-704

Gershwin, M.E., Beach, R.S. & Hurley, L.S. 1985. *Nutrition and immunity.* New York, Academic Press. 417 pages.

Goel, K.M. & Arneil, G.C. 1985. Rickets, old and new. *In:* G.C. Arneil & J. Mettcoff, eds. *Pediatric Nutrition*, p. 219-244. London, Butterworths.

Goldman, A.S. & Goldblum R.M. 1985. Protective properties of human milk. *In:* W.A. Walker & J.B. Watkins, eds. *Nutrition in pediatrics*, p. 819-828. Boston, Little Brown.

Grand, R.J., Sutphen, J.L. & Dietz, W.H. 1987. *Pediatric nutrition.* Boston, Butterworths.

Grappin, R., Jeunet, R., Pillet, R. & Toquin, A. 1981. A study of goat's milk. I. Contents of fat, proteins and nitrogen fractions. *Lait*, 61:117-133.

Gregory, M.E. 1975. Water-soluble vitamins in milk and milk products. *J. Dairy Res.* 42:197-216.

Gross, S.J. 1987. Effect of gestational age on the composition of breast milk. In: R.J. Grand, J.L. Sutphen & W.H. Dietz, eds. *Pediatric nutrition*, p. 265-278. Boston, Butterworths.

Hamosh, M. 1989. Enzymes in Human milk. *In:* E. Lebenthal, ed. *Textbook of gastroenterology and nutrition in infancy*, p.121-134. New York, Raven Press. 2nd ed.

Hamosh, M., Hong, M.H. & Hamosh, P. 1989. Beta-casomorphins - Milk ß-casein derivate opioid peptides. *In:* E. Lebenthal, ed. *Textbook of gastroenterology and nutrition in infancy*, p. 143-150. New York, Raven Press, 2nd ed.

Hanson, L.A. 1988. *Biology of human milk.* New York, Raven Press. 231 pages.

Haschka, F., Pietschnig, B., Karg, V., Vanura, H. & Schuster, E. 1987. Radioactivity in Austrian milk after Chernobyl accident. *N. Engl. J. Med.*, 316:409-410.

Hepner, G., Fried, R., St-Jeor, S., Fusetti, L. & Morin, R. 1979. Hypocholesterolemic effect of yogurt and milk. *Am. J. Clin. Nutr.*, 32:19-24.

Hermier, J. & Cerf, O. 1987. La stabilité du lait à la chaleur. *In* CEPIL. *Le lait matière première de l'industrie alimentaire*, p. 309-314. Paris, INRA.

I.N.R.A. ENSA Rennes, INA Paris-Grignon. 1989. *La composition du lait et ses incidences technologiques.* Paris, INRA, Rennes, ENSA. 540 pages.

Jalone, T., Isolawi, E., Heyman, M., Grain-Denoyelle, A.M., Sillanaukee, P. & Koivula, T. 1991. Increased ß-lactoglobulin absorption during rotavirus enteritis in infants: relationship to sugar permeability. *Pediatr. Res.*, 30:290-293.

James, W.P.T., Ferro-Luzzi, A., Isaksson, B. & Szostak, W.B. 1990. *Alimentation et santé.* La prévention des maladies d'origine alimentaire en Europe. OMS.

Jenness, R. & Sloan R.E. 1970. The composition of milk of various species: a review. *Dairy Sciences Abstract*, 32:599-612.

Jenness, R. 1974. The composition of milk. *In:* B. L. Larson & V.R. Smith, eds. *Lactation. A comprehensive treatise. III. Nutrition and biochemistry of milks; maintenance.* New York, Academic Press.

Jenness, R. 1979. Comparative aspects of milk proteins. *J. Dairy Res.*, 46:197-210.

Jensen, R.G. 1989. Lipids in human milk - Composition and fat soluble vitamins. *In:* E. Lebenthal, ed. *Textbook of gastroenterology and nutrition in infancy*, p. 157-208. New York, Raven Press. 2nd ed.

Jouzier, X. & Cohen-Maurel, E. 1986. *Manuel de référence pour la qualité du lait.* Paris, CIDIL-FNPL. 199 pages.

Juarez, M. & Ramos, M. 1986. Physico-chemical characteristics of goat's milk as distinct from those of cow's milk. *Bull. Intern. Dairy Fed.*, 202:54-67.

Kay, H.D. 1974. The water buffalo, milk and milk production. Rome, FAO.

Kay, H.D., Cuttell, J.R., Hall, H.S., Mattick, A.T.R. & Rowlands, A. 1954. *La pasteurisation du lait.* Genève, OMS. 222 pages.

Kjellman, N. 1988. Epidemiology of food allergy. *In* E. Schmidt. *Food allergy.* p. 119-124. New York, Raven Press.

Koroleva, N.S. 1988. Technology of Kefir and Kumys. *Bull. Intern. Dairy Fed.* 227:96-100.

Kretchmer, N. 1972. Lactose and lactase. *Sci. Am.*, 227:71-78.

Langlois, B. 1986. L'élevage du cheval en Union soviétique. *Bull. Tech. Dep. Genet. Anim.*, 40. INRA. 60 pages.

Larson, B.L. & Smith, V.R. 1974. *Lactation. A comprehensive treatise. Nutrition and biochemistry of milks; maintenance.* New York, Academic Press.

Laurence, R. 1985. *Breastfeeding - A guide for the medical profession.* Saint Louis, Mosby. 2nd Ed. 601 pages.

Lebenthal, E. 1989. *Textbook of gastroenterology and nutrition in infancy.* New York, Raven Press. 2nd ed.

Lechner, W., Huter, O., Daxenbichler, G. & Marth, C. 1986. Radioactivity in breastmilk after Chernobyl. *Lancet*, 1:1326.

Lemonnier, D. *et al.* (Mission Scientifique). 1989. *Les laits fermentés.* Actualité de la recherche. Paris, Syndifrais, John Libbey Eurotext, 285 pages.

Lentner, C. 1981. *Geigy scientific tables, volume 1: Units of measurement, body fluids, composition of the body, nutrition*, p. 213-216. Basel, Ciba Geigy. 8th ed.

Lifshitz, C.H. & Nichols, B.L. 1990. *Malnutrition in chronic diet-associated infantile diarrheas.* New York, Academic Press. 464 pages.

Luquet, F.M. 1985. *Laits et produits laitiers: vache, brebis, chèvre.* 3 volumes. Paris, Technique et Documentation, Lavoisier.

Luquet, F.M., Mahieu, H., Mouillet, L. & Boudier. 1979. A propos de l'origine de la contamination des laits en biphényles polychlorés. *Le lait*, 59:551.

Mahieu, H., Le Jaouen, J.C., Luquet, F.M. & Mouillet, L. 1977. Etude comparative de la composition et de la contamination des laits des espèces laitières bovines, ovines et caprines. *Le lait*, 57:565-568.

Mohamed, M.A. 1990. *Camel milk: chemical composition characterization of casein and preliminary trial of cheese making properties.* Sveriges Lantbruksuniv. 31 pages.

Mueller, T. & Schroeder, H. 1978. Biozide in menschlischem Fettgewelbe und Muttermilch. *Ernährungs Unschau*, 25:205.

Muggli, J. 1982. Composition of goat's milk. *Schwei Milchz*, 108:199.

Murata, T., Zabik, M.E. & Zabik, M. 1977. Polybrominated biphenyls in raw milk and processed dairy products. *J. Dairy Sci.*, 60:516.

National Research Council. 1989. *Recommanded dietary allowances.* Washington DC, National Academy Press. 10th ed. 285 pages.

Nichols, B.L., Mc Kee, K.S., Henry, J.F. & Putman, M. 1987. Human lactoferrin stimulates thymidine incorporation into DNA of rat crypt cells. *Pediatr. Res.*, 21:563-567.

O' Keefe, S., O' Keefe, E.A., Burke, E., Roberts, P., Lavender, R. & Kemp, T. 1991. Milk induced malabsorption in malnourished african patients. *Am. J. Clin. Nutr.*, 54:130-135.

OCDE. 1991. *Statistiques de la consommation des denrées alimentaires*. 1979-1988. Paris, OCDE.

OMS. 1986. *Toxicological evaluation of certain food additives and contaminants*. Rome, Cambridge University Press.

OMS. 1987. *Quantité et qualité du lait maternel*. Rapport d'une étude collective. Genève, OMS. 151 pages.

OMS/AIEA. 1989. *Oligo-éléments, éléments mineurs et éléments en traces dans le lait maternel*. Rapport d'une étude collective. Genève, OMS. 161 pages.

Rasic, J.L. & Kurman, J.A. 1978. *Yoghurt. Scientific grounds, technology, manufacture and preparations*. Copenhagen, Technical Dairy Publishing House. 428 pages.

Rassin, D.K., Sturman J. & Gaull G.E. 1978. Taurine and other free aminoacids in milk of man and other mammals. *Earl. Hum. Dev.* 2(1):1-13.

Reiter, B. 1984. Role of nonantibody proteins in milk in the protection of the newborn. *In:* A.F. Williams & J.D. Baum, ed. *Human banking*, p. 29-53. New York, Raven Press.

Renaud, J. 1985. Les processus d'athérosclérose et de thrombose. *In* S. Hercberg, S. Dupin, L. Papoz & P. Galan. *Nutrition et santé publique*. Approche épidémiologique et politique de prévention. Paris, Lavoisier.

Renner, E. 1983. *Milk and dairy products in human nutrition*. München, Volkswirtschaftlicher Verlag. 450 pages.

Renner, E. 1989. *Micronutrients in milk and milk-based food products*. London, Elsevier Applied Science. 311 pages.

Renterghem, R. 1976. L'influence des procédés technologiques de préparation du lait de consommation sur la teneur en pesticides organochlorés. *Le lait*, 56:558.

Renterghem, R., Moermans, R. & Brack, J. 1979. Traitement statistique des résultats d'une étude circulaire interlaboratoire concernant le dosage des pesticides organochlorés dans le lait et les produits laitiers. *Le lait*, 59:583-584.

Roberts, L. 1991a. Dioxin risks revisited. *Science*, 251:624-626.

Roberts, L. 1991b. More pieces in the dioxin puzzle. *Science*, 254:377.

Rogan W.J., Bagniewska, A. & Damstra, T. 1980. Pollutants in breast milk. *N. Engl. J. Med.*, 302:1450-1453.

Rosenberg, I.H. & Scrimshaw, N.S. 1972. Malabsorption and nutrition I. *Am. J. Clin. Nutr.*, 25:1046-1142.

Rosenberg, I.H. & Scrimshaw, N.S. 1972. Malabsorption and nutrition II. *Am. J. Clin. Nutr.*, 25:1226-1289.

Sanguansermsri, J., Gyorgi, P. & Zilliken, F. 1974. Polyamines in human and cow's milk. *Am. J. Clin. Nutr.*, 37:859-865.

Sawaya, V.N., Khalil, J.K. & Alshalat, A.F. 1984. Mineral and vitamin content of goat's milk. *J. Am. Diet. Assoc.*, 84:433-435.

Scanff, P., Savalle, B., Miranda, G., Pelissier, J.P., Guilloteau, P. & Toullec R. 1990. In vivo gastric digestion of milk proteins. Effect of technological treatments. *Agric. Food. Chem.*, 38:1623-1629.

Scrimshaw, N.S. & Murray, E.B. 1988. The acceptability of milk and milk products in populations with a high prevalence of lactose intolerance. *Am. J. Clin. Nutr.*, (suppl) 48(4):1083-1159.

Scriver, C.R., Beaudet, A.L., Sly, W.S., Valle, D. 1989. *The metabolic basis of inherited disease*. New York, Mc Graw Hill. 6th ed. 3006 pages.

Schmidt, D.G. 1980. Colloidal aspects of caseine. *Neth Milk Dairy J.*, 34:42-64

Solis Peyrera, B. & Lemonnier D. 1991. Induction of 2'-5'A synthetase activity and interferon in humans by bacteria used in dairy products. *Eur. Cytokine Net.*, 2:137-140.

Solis Peyrera, B. & Lemonnier, D. 1993. Induction of human cytokines by bacteria used in dairy foods. *Nutr. Res.*, 13:1127-1140.

Spik, G., Brunet, B., Mazurier-Dehaine, C., Fontaine, G. & Montreuil, J. 1982. Characterization and properties of the human and bovine lactotransferrins extracted from the faeces of newborn infants. *Acta Paediatr. Scand.*, 71:979-985.

Thakur, C.P. & Jha, A.N. 1981. Influence of milk, yogurt and calcium on cholesterol induced atherosclerosis in rabbits. *Atherosclerosis*, 39:211-215.

Tsang, R.C. & Nichols, B.L. 1988. *Nutrition during infancy*. Philadelphia, Hanley and Belfus. 440 pages.

Uauy, R. 1989. Dietary nucleotides and requirements in early life. *In:* E. Lebenthal,

ed. *Textbook of gastroenterology and nutrition in infancy,* p. 265-280. New York, Raven Press. 2nd ed.

Veisseyre, R. 1975. *Technologie du lait.* 3e édition. Paris, La Maison Rustique. 714 pages.

Vis, H.L. & Hennart, P.H. 1978. Decline in breast-feeding (about some of its causes). *Acta Paediatr. Belg.,* 31:195-206.

Vis, H.L., Yourassowsky, C. & Van der Borght, H. 1975. *A nutritional survey in the Republic of Rwanda.* Tervuren, Belgique, Musée Royal de l'Afrique Centrale. Annales. Série n°8. Sciences humaines n°87.

Viteri, F.E. & Schneider, R.E. 1974. Gastrointestinal alterations in protein-calorie malnutrition. *Med. Clin. N. Am.,* 58:1487-1505.

Walker-Smith, J.A., Mc Neish, A.S. 1986. *Diarrhoea and malnutrition in childhood.* London, Butterworths. 249 pages.

Williams, A.F. & Baum, J.D. 1984. *Human milk banking.* New York, Raven Press. 196 pages.

Williams, A.P., Bishop, D.R., Cockburn, J.E., Scott, K.J. 1976. Composition of ewe's milk. *J. Dairy Res.,* 43:325-329.

Withney, R., Brunner, J.R., Ebner, K.E., Farrell, H.M., Josephoon, R.V., Moor, C.V. & Swaigsgood, H.E. 1976. Nomenclature of the proteins in cow's milk. Fourth revision. *J. Dairy Sci.* 59:795-815.

Wright, C.E. & Gaull, G.E. 1988. Taurine in human milk: biological significance. *In:* L.A. Hanson, ed. *Biology of human milk,* p.95-104. New York, Raven Press.

Wright, J.A., Walker & A.W. 1987. Breast milk and host defense of the infant. *In:* R.J. Grand, J.L. Sutphen & W.H. Dietz, eds. *Pediatric nutrition,* p. 293-303. Boston, Butterworths.

Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine fait le point sur l'ensemble des aspects nutritionnels du lait et des produits laitiers en tenant compte de l'évolution des connaissances scientifiques et techniques de ces dernières années. Les propriétés physico-chimiques, la composition et les qualités nutritionnelles du lait de femme et du lait des principales espèces domestiques y sont analysées. Les principes de technologie, les modalités de fabrication ainsi que les propriétés nutritionnelles des différents types de produits laitiers y sont également présentés. Cet ouvrage aborde enfin la place du lait et des produits laitiers dans l'alimentation du sujet en bonne santé ou atteint de diverses pathologies, en particulier de l'enfant mal nourri.

Les données scientifiques provenant d'études et d'expériences sur les caractéristiques nutritionnelles et les technologies de production du lait et des produits laitiers ont été soigneusement analysées et sont présentées sous forme de tableaux et de figures illustrant le texte.

Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine s'adresse plus particulièrement aux techniciens en nutrition et en technologie alimentaire, aux agronomes, aux vulgarisateurs agricoles, aux spécialistes de l'économie familiale, aux médecins, aux infirmiers, ainsi qu'à tous ceux s'intéressant au rôle du lait et de ses produits dans la nutrition humaine.

